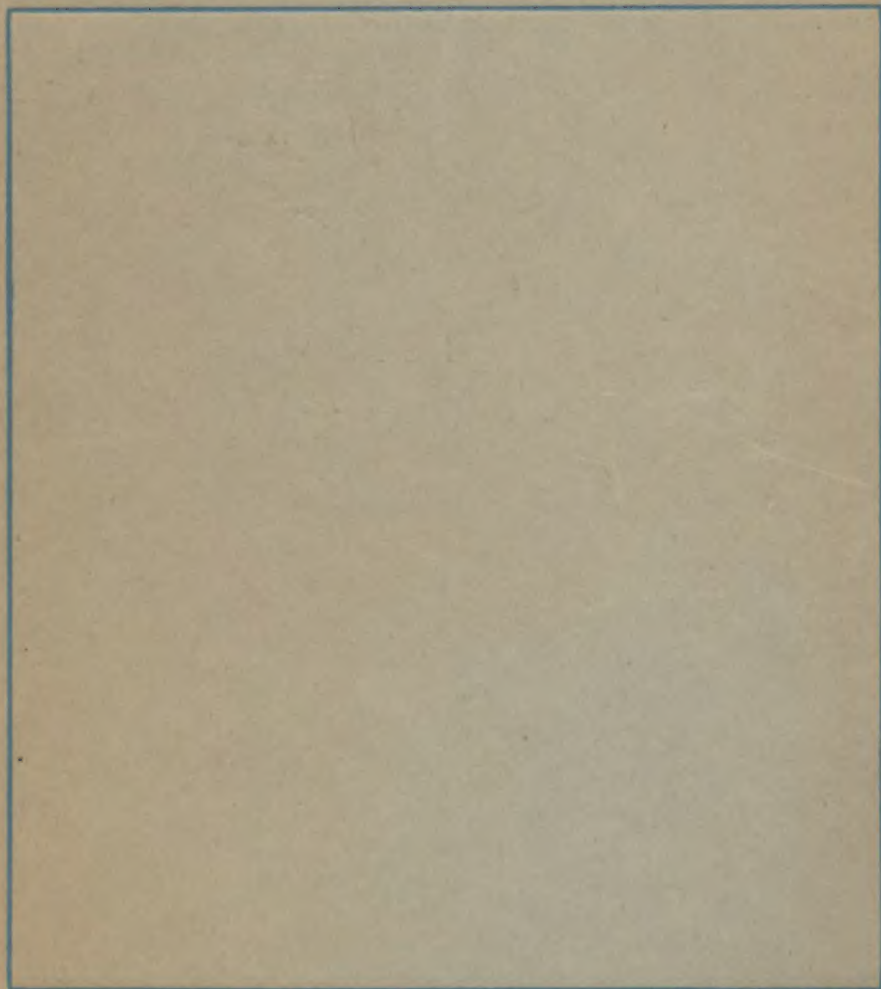


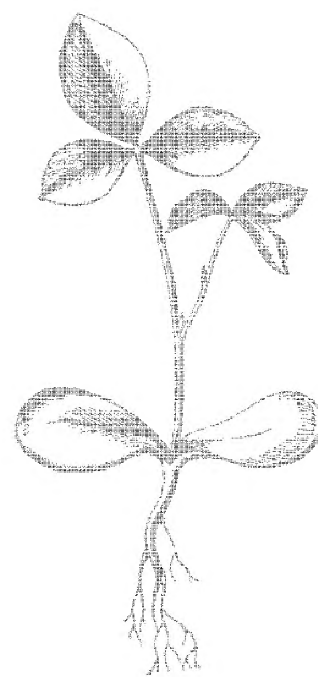
СПРАВОЧНИК ПО ПАЙКЕ

СПРАВОЧНИК ПО ПАЙКЕ



СПРАВОЧНИК ПО ПАЙКЕ

**Под редакцией
С. Н. ЛОЦМАНОВА, И. Е. ПЕТРУНИНА,
В. П. ФРОЛОВА**



Scan AAW

**Москва
«Машиностроение»
1975**



6П4.3

С74

УДК 621.791.3 (083)

АВТОРЫ:

ГРЖИМАЛЬСКИЙ Л. Л., канд. техн. наук; **ГУБИН А. И.**, канд. техн. наук; **ЕКАТОВА А. С.**, канд. техн. наук; **ЕРОШЕВ В. К.**, канд. техн. наук; **ИЛЬЕВСКИЙ И. И.**, канд. техн. наук; **КИСЕЛЕВ И. И.**, инж.; **ЛОЦМАНОВ С. Н.**, канд. техн. наук; **МАРКОВА И. Ю.**, канд. техн. наук; **НИКОЛАЕВ Г. А.**, чл.-корр. АН СССР; **НОВОСАДОВ В. С.**, канд. техн. наук; **ОРЛОВА В. В.**, инж.; **ПЕТРУНИН И. Е.**, канд. техн. наук; **СТРЕКАЛОВ Г. Н.**, инж.; **ФРОЛОВ В. П.**, д-р техн. наук.; **ШЁИН Ю. Ф.**, канд. техн. наук.

Справочник по пайке. Под. ред. С. Н. Лоцманова,
С 74 И. Е. Петрунина, В. П. Фролова. М., «Машиностроение»,
1975 г.
407 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: Л. Л. Гржимальский, А. И. Губин,
А. С. Екатова и др.

В книге приведены справочные сведения по основным способам и технологическим процессам пайки, по припоям, флюсам, газовым средам, оборудованию, контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуре, производственной санитарии и технике безопасности. Освещены вопросы проектирования технологического процесса, повышения экономической эффективности производства, прочности паяных изделий.

Книга предназначена для инженеров-конструкторов, расчетчиков и технологов машиностроительных проектно-конструкторских и технологических организаций.

С $\frac{31206-087}{038(01)-75}$ 87-75

6П4.3

Введение (И. Е. Петрунин)	5	Глава 5. Оборудование для пайки (Л. Л. Гржимальский, И. И. Ильевский)	131
Глава 1. Физико-химические основы пайки (И. Е. Петрунин)	7	Пайка в печах	131
Кинетика образования спая	7	Электropечи с контролируемой атмосферой	131
Основные понятия	7	Установки для получения контролируемых атмосфер	140
Классификация спаев	9	Вакуумные электropечи	143
Спаи между металлами	10	Индукционные электropечи	154
Физико-химические процессы при пайке	18	Пайка индукционная	156
Смачивание и растекание припоев	18	Установки для индукционной пайки	156
Капиллярное течение припоев	24	Индукторы	160
Самофлюсование в процессе образования спая	27	Выбор параметров индукционных установок	161
Влияние основного металла и количества жидкой фазы на формирование спая	31	Пайка электросопротивлением	163
Непрерывная структурная связь в шве	37	Специальные установки для пайки	167
Влияние газовой среды и состава припоя на свойства паяных соединений	38	Пайка погружением	168
Список литературы	44	Печи-ванны для пайки погружением в расплавы солей	168
Глава 2. Способы пайки (В. С. Новосадов)	47	Установки для пайки погружением в расплавы припоев	171
Контактно-реактивная пайка	48	Пайка концентрированными источниками энергии	172
Реактивно-флюсовая пайка	53	Установки с кварцевыми лампами	172
Диффузионная пайка	55	Электронно-лучевые установки	174
Некапиллярная пайка	58	Лазерные установки	175
Пайка композиционными припоями	59	Пайка горелками	176
Список литературы	61	Оборудование для газопламенной пайки	176
Глава 3. Припой (А. И. Губин, В. В. Орлова)	62	Горелки	183
Медные припой	62	Паяльники	189
Серебряные, золотые, палладиевые и платиновые припой	72	Контрольно-измерительная и регулирующая аппаратура	193
Никелевые припой	81	Термометры	194
Железные и марганцевые припой	84	Потенциометры автоматические электронные	195
Алюминиевые припой	85	Милливольтметры	202
Магниеые припой	87	Пирометры излучения	203
Оловянно-свинцовые припой	87	Термопары	205
Свинцовые припой	92	Список литературы	208
Индиевые припой	93	Глава 6. Подготовка поверхности и сборка под пайку (И. Ю. Маркова)	210
Цинковые, кадмиевые и висмутовые припой	94	Очистка поверхности металлов под пайку	210
Галлиевые и титановые припой	98	Предварительное нанесение металлических покрытий	235
Список литературы	101	Сборка под пайку и нанесение припоя	239
Глава 4. Флюсы и газовые среды (А. С. Екатова)	102	Технологическая оснастка	243
Флюсы для высокотемпературной пайки	104	Список литературы	250
Флюсы для низкотемпературной пайки	110	Глава 7. Технологический процесс пайки (С. Н. Лоцманов и Ю. Ф. Шеин)	251
Способы приготовления и нанесения флюсов	119	Пайка углеродистых и низколегированных сталей	251
Удаление остатков флюсов	121	Пайка нержавеющей сталей	252
Газовые среды для пайки	122	Пайка жаропрочных сталей и сплавов	256
Список литературы	130		

Пайка инструментальных сталей	258	Прочность паяных соединений	332
Пайка металлокерамических		Влияние дефектов на прочность	
твердых сплавов	260	при статических нагрузках . . .	339
Пайка чугуна	262	Прочность при переменных на-	
Пайка меди и ее сплавов	262	грузках	340
Пайка никеля и его сплавов	266	Влияние дефектов на механиче-	
Пайка титана и его сплавов	268	ские свойства при переменных	
Пайка молибдена	269	нагрузках	341
Пайка ниобия и его сплавов	271	Пластические свойства паяного	
Пайка вольфрама	271	шва	342
Пайка циркония	273	Допускаемые напряжения в пая-	
Пайка тантала	275	ных соединениях	343
Пайка бериллия	276	Список литературы	345
Пайка алюминия и его сплавов	277		
Пайка магниевых сплавов . . .	281		
Список литературы	285		
Г л а в а 8. Пайка металла с керами-		Г л а в а 10. Проектирование техно-	
кой (В. К. Ерошев)	286	логического процесса пайки	
Пайка металлизированной кера-		(В. П. Фролов)	346
мики	287	Задачи и принципы технологиче-	
Активная пайка	294	ского проектирования	346
Пайка керамики с металлами		Понятие о моделировании и об-	
стеклоприпоем	297	щей математической модели . .	347
Пайка керамики с металлом без		Элементы математической моде-	
спекания металлизационного		ли технологического процесса	
слоя	298	пайки	349
Пайка неметаллизированной ке-		Логическая и операторная схемы	
рамики с металлами под давле-		алгоритма	374
нием	298	Этапы ПТП с использованием	
Конструкционные материалы		математической модели	377
для металлокерамических узлов		Кодирование технологической	
Конструирование и расчет пая-		документации	378
ных соединений	303	Список литературы	380
Список литературы	319		
Г л а в а 9. Прочность и конструи-		Г л а в а 11. Производственная са-	
рование паяных соединений		нитария, техника безопасно-	
(Г. А. Николайев, И. И. Кисе-		сти и противопожарная техни-	
лев)	321	ка (Г. Н. Стрекалов)	382
Виды паяных соединений . . .	321	Общие положения	382
Концентрация напряжений в		Подготовка к пайке. Рабочее ме-	
соединениях встык	322	сто паяльщика	382
Концентрация напряжений в со-		Техника безопасности при экс-	
единениях внахлестку	323	плуатации оборудования	386
Концентрация напряжений от		Техника безопасности при вы-	
неравномерной работы спая по		полнении паяльных работ . . .	386
длине	323	Санитарная гигиена и техника	
Концентрация напряжений,		безопасности при производстве	
вызванная изгибом элементов	324	припоев и флюсов	390
Собственные напряжения и де-		Первая помощь при поражении	
формации в паяных конструк-		электрическим током	394
циях	325	Противопожарная техника . . .	395
		Список литературы	397
		Предметный указатель	398

ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН

- γ — плотность, г/см³.
 α — температурный коэффициент линейного расширения, 1/° С.
 ρ — удельное электросопротивление, Ом·мм²/м.
 λ — удельная теплопроводность, кал/см·с·°С.
 σ_B — предел прочности при растяжении, кгс/мм².
 $\tau_{ср}$ — предел прочности при срезе, кгс/мм².
 a_u — ударная вязкость кгс·м/см².
 δ — относительное удлинение, %.
HV — твердость по Бринеллю,

ВВЕДЕНИЕ

Пайка имеет много общего со сваркой плавлением, но между ними имеются и принципиальные различия. Если при сварке основной и присадочный металлы находятся в сварочной ванне в расплавленном состоянии, то при пайке основной металл не плавится.

Пайка — процесс соединения материалов в твердом состоянии припоями, которые при расплавлении затекают в зазор, смачивают паяемые поверхности и при кристаллизации образуют паяный шов.

Для получения спая, т. е. связи на границе основной металл — припой, наряду с нагревом необходимо обеспечить еще два основных условия: удалить с поверхности металлов окисную пленку и обеспечить условия взаимодействия твердого и жидкого металлов. При кристаллизации вступившего во взаимодействие с паяемыми металлами более легкоплавкого связующего металла (припоя) образуется паяное соединение.

При пайке формирование шва происходит путем заполнения припоем зазора между соединяемыми деталями, т. е. процесс пайки в большинстве случаев связан с капиллярным течением, что не имеет места при сварке плавлением.

В отличие от сварки плавлением пайка может быть осуществлена при любых температурах, лежащих ниже температуры плавления основного металла. Одним из преимуществ пайки является возможность соединения в единое целое за один прием множества заготовок, составляющих изделие. Поэтому пайка, как ни один другой способ соединения, отвечает условиям массового производства. Она позволяет соединять разнородные металлы, а также металлы со стеклом, керамикой, графитом и другими неметаллическими материалами, что невозможно или весьма трудно осуществить сваркой.

Поскольку при пайке не происходит расплавления кромок паяемых деталей, то при использовании этого способа соединения проще сохранить в процессе изготовления требуемую форму и размеры изделия. Применяя низкотемпературную пайку, удастся сохранить неизменной структуру и свойства металла соединяемых деталей. Важным преимуществом пайки является разъемность паяных соединений, что делает ее незаменимой при монтажных и ремонтных работах в радио- и приборостроении.

Наряду с этим пайка обеспечивает в ряде случаев более высокую надежность изделий, чем сварка. При применении рациональных сочетаний паяемых материалов и припоев и использовании конструкций с оптимальной площадью перекрытия надежность паяных соединений в 4 раза выше, чем сварных, для самолетов и в 20 раз выше для космических аппаратов*.

В соответствии с природой и особенностями технологического процесса пайку классифицируют:

- по характеру взаимодействия твердого и жидкого металлов при возникновении спая;

- по особенностям образования паяного соединения;

- по способам нагрева.

По характеру взаимодействия и природе связей на границе основной металл — припой выделяют четыре вида спаев: бездиффузионный, растворо-диффузионный, контактно-реакционный и диспергированный.

По особенностям технологии получения паяного соединения (режим пайки, способ введения припоя, формование шва) выделяют капиллярную пайку, диффузионную, контактно-реактивную, реактивно-флюсовую и некапиллярную пайку.

* Инженерный справочник по космической технике. Под общей редакцией А. В. Солодова. М., Воениздат, 1969.

Эти виды пайки могут быть осуществлены с применением различных способов в зависимости от применяемых средств нагрева.

Развитие пайки за годы Советской власти в первую очередь связано с созданием новых отраслей производства, с разработкой новых образцов техники, применением новых материалов.

Резкое повышение интереса к пайке произошло в годы первых пятилеток, когда промышленность освоила массовый выпуск различных изделий и переходила на поточную пайку ответственных деталей в печах с контролируемой атмосферой.

За годы Отечественной войны 1941—1945 гг. применение пайки в промышленности возросло в несколько раз. Такой прогресс был связан в первую очередь с выпуском большого количества оружия и боеприпасов. Наряду с этим широкое применение в годы войны пайка нашла также при изготовлении двигателей, в самолетостроении, в автомобилестроении, в кораблестроении.

С развитием в послевоенные годы ракетостроения, атомной техники, радиоэлектроники пайка получает дальнейшее развитие. Многие современные конструкции удалось сделать более технологичными и значительно улучшить их эксплуатационные характеристики только в результате применения пайки.

Пайка является перспективным технологическим процессом, значение которого будет возрастать с расширением применения легированных сталей, специальных сплавов, неметаллических и композитных материалов в народном хозяйстве. Этот прогресс будет идти как по линии разработки новых видов пайки, припоев, флюсов, газовых сред, способов нагрева, средств механизации и автоматизации, так и по линии раскрытия природы пайки и выявления не известных еще возможностей этого технологического процесса.

Никакой другой процесс, кроме пайки, не вмещает в себя такой широкий круг физико-химических явлений, протекающих в твердой, жидкой и газовой фазе: восстановление и диссоциация, испарение и возгонка, смачивание и капиллярное течение, диффузия и растворение, пластифицирование и адсорбционное понижение прочности и т. д. Это делает особо актуальным изучение процессов, протекающих между твердым паяемым металлом и припоем, флюсом, газовой средой, не только для разработки проблем пайки, но и в целях познания природы многих химических, электрохимических, физических, термодинамических, металлургических и других процессов.

КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ СПАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Исходя из физико-химической природы пайку в общем случае можно определить как процесс соединения материалов в твердом состоянии с нагревом до температур ниже их точек плавления путем введения в зазор и кристаллизации взаимодействующей с ними жидкой металлической или неметаллической прослойки.

Из определения следует:

пайка осуществляется с применением нагрева до температур ниже точек плавления соединяемых материалов;

процесс пайки во всех случаях связан с введением в зазор между соединяемыми материалами жидкой металлической или неметаллической прослойки, являющейся припоем;

соединение образуется в результате реакции в зоне контакта паяемый материал — расплав припоя;

завершающей стадией пайки во всех случаях является кристаллизация жидкой фазы, находящейся между соединяемыми пайкой поверхностями твердых тел.

При рассмотрении этих признаков можно убедиться, что основное содержание процесса пайки есть физико-химическое взаимодействие (реакция) на границе твердого и жидкого материалов, результатом которого является возникновение после кристаллизации жидкости, находящейся в зазоре, неразъемного при комнатной температуре соединения. Пайкой можно соединять металлы и неметаллические материалы в любых сочетаниях, применяя в качестве припоев также металлы и неметаллы.

Образующееся при пайке соединение по своему строению и составу неоднородно и включает литую прослойку (шов) и диффузионные зоны (рис. 1, см. вкл.).

Шов — неоднородная по составу и строению прослойка между соединяемыми деталями, которая образуется в результате взаимодействия жидкого припоя с основным материалом и последующей кристаллизации.

Связь между литой прослойкой (швом) и основным металлом возникает в результате образования спаев.

Спай — переходный слой на границе основной материал — зона сплавления, образующийся в процессе пайки в результате взаимодействия на межфазной границе и обеспечивающий связь между основным материалом и литой прослойкой (швом).

Диффузионная зона — граничащий со швом слой основного материала с измененным химическим составом и микроструктурой, образовавшийся в результате диффузии компонентов припоя и паяемого материала.

Для образования спая, т. е. возникновения металлической или неметаллической связи в контакте основной материал — припой, требуется:

активация поверхности основного материала и припоя;

химическая реакция между основным материалом и расплавом припоя; кристаллизация жидкости, заполняющей зазор между соединяемыми пайкой материалами.

На начальной стадии взаимодействия образование общей границы твердого и жидкого материалов при пайке связано со стремлением системы снизить межфазную энергию.

В процессе смачивания две свободные поверхности заменяются одной границей фаз между твердым паяемым материалом и расплавом припоя с более низкой свободной поверхностной энергией системы. На этой стадии образования спая основную роль играют квантовые процессы. Образовавшиеся первоначально в отдельных местах на межфазной границе связи очень быстро распространяются по всей площади контакта основной материал — расплав припоя.

Если рассматривать процесс взаимодействия между паяемым материалом и расплавом припоя * как химическую реакцию на границе фаз, то скорость реакции в общем виде можно выразить уравнением [23]

$$\frac{dx}{dt} = (N_0 - x)(N_1 - x) \nu \exp\left(-\frac{Q}{KT}\right) \exp \frac{S}{K}, \quad (1)$$

где x — число атомов, вступивших в химическую связь; N_0 и N_1 — число контактирующих атомов на поверхности основного материала и расплава припоя; ν — частота собственных колебаний атомов; Q — энергия активации образования химических связей; $S = K \ln \omega_1 \omega_2$ — энтропия активации, учитывающая вероятность ω_1 , благоприятной ориентации возбужденных атомов каждого вещества одного относительно другого и вероятность ω_2 моментов их возбуждения; K — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Поскольку при пайке происходит смачивание основного металла и возникает ориентационное соответствие частиц твердого материала и расплава, то необходимость благоприятной ориентации можно не учитывать.

При температуре пайки, т. е. в момент образования связей между твердым и жидким металлами, все атомы основного металла и припоя возбуждены, поэтому член, учитывающий энтропию,

$$\exp \frac{S}{K} \approx 1. \quad (2)$$

Тогда уравнение примет вид

$$\frac{dx}{dt} = (N_0 - x) \nu \exp\left(-\frac{Q}{KT}\right). \quad (3)$$

Проинтегрировав при $T_{\text{пайки}} = \text{const}$ и подставив $t = 0, x = 0, t = t_a, x = N$, получим время, в течение которого прореагирует N атомов:

$$t_a = -\frac{1}{\nu} \ln \left(1 - \frac{N}{N_0}\right) \exp \frac{Q}{KT}. \quad (4)$$

Выражение $\frac{N}{N_0}$ может быть приближенно оценено по относительной прочности спая между основным материалом и припоем, когда процесс массопереноса между ними отсутствует. Из приведенного уравнения можно получить выражение, описывающее изменение относительной прочности спая,

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \exp \left[-\frac{\nu t_a}{\exp\left(\frac{Q}{KT}\right)} \right]. \quad (5)$$

В зависимости от изменения температуры или других параметров процесса пайки условия взаимодействия в контакте основной материал — припой меняются, что, в свою очередь, меняет условия равновесия в зоне реакции. При этом переход

* Рассматривается взаимодействие простых веществ.

атомной системы основной материал — припой в равновесие в соответствии с новыми условиями осуществляется не мгновенно, а за некоторый конечный промежуток времени. Это запаздывание атомной системы характеризуют или временем запаздывания (ретардации) или, если рассматривать обратный переход системы в первоначальное состояние, временем релаксации, под которым понимают промежуток времени, необходимый для ослабления вызванного возмущения до некоторой определенной величины после устранения внешнего воздействия. При пайке иногда необходимо получить соединение с определенными свойствами. В этом случае при образовании спая период релаксации межфазной энергии необходимо учитывать. Продолжительность периода запаздывания диффузионных процессов приблизительно можно оценить по уравнению [41]

$$\tau_p = \tau_0 e^{(Q_T + Q_{\text{ж}})/(2RT)}, \quad (6)$$

где τ_0 — постоянная времени; e — постоянная, учитывающая пик межфазной энергии; Q_T , $Q_{\text{ж}}$ — энергия активации диффузии элементов соответственно твердого основного материала и расплавленного припоя; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

В тех случаях, когда продолжительная выдержка не приводит к ухудшению прочностных характеристик спая, время контактирования основного материала с расплавом припоя может быть увеличено.

Поскольку процесс пайки осуществляется при температурах, превышающих точку плавления припоя, а при этом расплавленный металл зоны сплавления характеризуется ближним порядком, то атомы жидкости, попадая в сферу действия атомов решеток кристаллов основного материала, распределяются на его поверхности в определенном кристаллографическом порядке. В результате на межфазной границе образуется слой, который осуществляет связь, с одной стороны, твердого материала, с другой стороны, расплава. Нагрев в процессе пайки усиливает подвижность атомов, между которыми легче достигается контакт, а диффузионный обмен между атомами твердого и жидкого веществ приводит к упрочнению образовавшихся связей. Последующая кристаллизация зоны сплавления фиксирует процессы взаимодействия на том или ином уровне их развития и приводит к образованию паяного соединения.

КЛАССИФИКАЦИЯ СПАЕВ

В зависимости от соотношения физико-химических свойств основного материала и припоя, а также условий и режима пайки переходный слой (спай), образующийся между ними, в процессе взаимодействия может иметь различное строение. Если рассмотреть начальный момент взаимодействия на поверхности раздела твердой и жидкой фаз при температуре пайки (рис. 2), то часть переходного слоя, примыкающего к внутреннему объему основного материала, равно как и расплава припоя, не затронутых изменениями, имеют состав, близкий к исходным.

В общем случае пайка может завершаться (путем прекращения нагрева) как на более ранней стадии взаимодействия на границе основной материал — расплав припоя, так и на последующей, более глубокой стадии развития процессов взаимодействия в зоне спая. В соответствии с этим будут меняться состав и структура спаев.

В зависимости от природы веществ в результате взаимодействия твердой и жидкой фаз можно получать спаи между металлами; между металлами и неметаллами; между неметаллами.

Процесс взаимодействия основного материала и расплавленного припоя в зависимости от продолжительности может быть зафиксирован на разной стадии формирования соединения.

Если процесс фиксируется на стадии образования химических связей, когда гетерогенной диффузией в объеме взаимодействующих металлов можно пренебречь, то такой спай называют «бездиффузионным».

Смачивание основного металла расплавленным припоем создает условия для развития диффузионных и растворно-диффузионных процессов между ними. Спай, образующийся в условиях протекания растворно-диффузионных процессов в зонах

контакта твердого и жидкого металлов, называют растворно-диффузионным. В зависимости от природы основного металла и припоя растворно-диффузионный спай может быть образован металлами с неограниченной растворимостью, с ограниченной растворимостью и дающими эвтектические смеси.

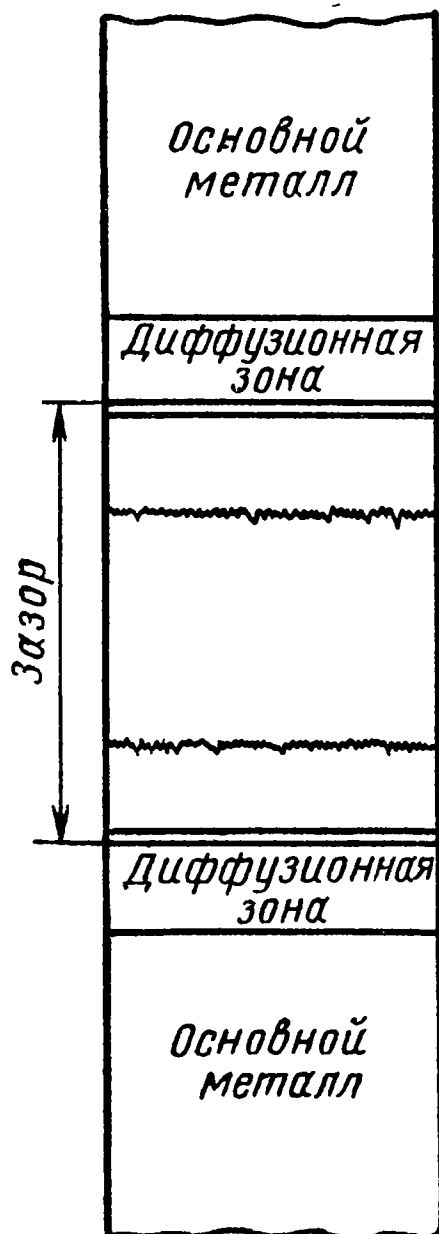


Рис. 2. Схема строения паяного соединения

Соединение при пайке может быть получено и без введения припоя. В этом случае используют явление контактного плавления. Спаи, образующиеся при пайке в результате контактного плавления, относят к контактно-реакционным. Этот вид спаев отличается следующим:

пайка идет без припоя и при температурах ниже точек плавления взаимодействующих металлов;

процесс образования спаев при температуре пайки начинается при отсутствии жидкой фазы;

развитие процессов взаимодействия в зоне спаев происходит в направлении увеличения количества жидкой фазы в шве.

Среди применяемых в технике металлов имеется значительная группа таких, представители которых между собой не сплавляются и не вступают в химические соединения. Ранее считалось, что образование между ними спаев невозможно. Однако в работе [32] показано, что в этих случаях также возможно образование спаев. Например, железо и свинец в жидком состоянии практически взаимно неразстворимы. Вольфрам не образует сплавов с медью, марганцем, серебром, оловом. При пайке указанные легкоплавкие металлы смачивают соответственно железо и вольфрам, затекают в капиллярные зазоры и обеспечивают формирование соединений. При образовании таких спаев, как правило, требуется высокая степень термической активации, что достигается перегревом. Необходимый перегрев при пайке вольфрама медью, марганцем, серебром и оловом в среде водорода с точкой росы -50°C и содержанием кислорода не выше 0,0005% по объему указан в табл. 1. Установлено, что в этих случаях при пайке происходит не

истинное растворение паяемого металла в припоях, а диспергирование в результате сильного снижения свободной поверхностной энергии твердого металла под действием расплава припоя. Поэтому спаи между металлами, которые между собой не сплавляются и не дают химических соединений, названы диспергированными.

1. Температуры плавления Sn, Cu, Mn, Ag и температуры пайки ими вольфрама

Основной металл	Припой	Температура плавления припоя, $^{\circ}\text{C}$	Температура пайки, $^{\circ}\text{C}$	Перегрев, $^{\circ}\text{C}$
Вольфрам	Олово	231,9	930	698,1
	Медь	1083	1120	37
	Марганец	1250	1500	250
	Серебро	960,8	1300	339,2

Классификация спаев, образующихся при взаимодействии неметаллов с металлическими припоями, а также неметаллов с расплавами неметаллов, пока не разработана.

СПАИ МЕЖДУ МЕТАЛЛАМИ

«Бездиффузионный» спай. В процессе пайки основной металл и расплавленный припой вступают в физико-химическое взаимодействие, обусловленное различиями их свойств и энергетического состояния. При снижении температуры пайки

и уменьшении времени выдержки интенсивность взаимодействия на межфазной границе снижается, между основным металлом и припоем возможно образование химических связей при отсутствии гетеродиффузии или ограничении ее до значений, лежащих ниже чувствительности существующих инструментальных методов.

На природу процесса образования связей при взаимодействии между однородными и разнородными металлами существуют различные взгляды.

Согласно «пленочной» теории [1—4, 57] соединение между металлами образуется при наличии лишь сближения чистых поверхностей. Таким образом, для образования связей достаточно удаления окисных и адсорбционных пленок с контактирующих между собой металлов. При условии сближения металлов на расстояния, соизмеримые с межатомными, согласно этой теории для образования соединения преодоления энергетического барьера не требуется.

Диффузионная гипотеза [24] связывает образование соединения с процессами гетеродиффузии.

По рекристаллизационной теории [53] для возникновения соединения между металлами необходимы рекристаллизационные процессы.

Энергетическая гипотеза [43] исходит из того, что для образования связей между металлами необходимо, чтобы энергия атомов кристаллических решеток контактирующих металлов превышала определенный энергетический порог. После его преодоления и образования двумерных зародышей, если выделяющаяся энергия достаточна для образования межатомных связей, то в зоне контакта начинается спонтанный процесс увеличения площади соединения.

При пайке, когда взаимодействуют твердый и жидкий металлы, возможно образование химических связей различного типа, при этом в зависимости от условий и режима пайки реакции могут иметь различное развитие в объеме. Начальной стадией взаимодействия во всех случаях являются реакции между атомами, находящимися на поверхности металлов, поэтому возможность «бездиффузионного» спая лимитируется продолжительностью периода ретардации, т. е. временем, предшествующим протеканию диффузионных процессов, начиная с момента возникновения контакта между твердым и жидким металлами.

Возможность образования соединения при ограниченной или отсутствующей гетеродиффузии на примерах взаимодействия металлов с полимерами и клеями экспериментально подтверждена в работах [11, 13, 21].

Работы [4, 6, 20, 44] доказывают возможность «бездиффузионного» соединения между неметаллами, между неметаллами и металлами, а также между металлами в твердом состоянии.

Возможность и кинетика процесса образования «бездиффузионного» соединения при пайке, когда взаимодействуют различные по природе твердый и жидкий металлы, рассмотрены в работах [34, 35].

В работе [36] экспериментально подтверждена возможность получения «бездиффузионного» спая на примере пайки железа оловом.

Как следует из табл. 2, период решетки железа, контактировавшего с расплавленным оловом при 500° С в течение до 30 с, не изменяется. Это, по-видимому, связано с тем, что диффузия атомов олова в кристаллическую решетку железа сильно затруднена, что подтверждается постоянством периода решетки железа при различном времени контакта с расплавленным оловом.

2. Изменение параметров решеток Fe и Sn в зависимости от продолжительности контакта между ними при температуре пайки

Время выдерж- ки, с	Периоды решеток, Å ± 0,001					Объем ячейки, Å		Количество железа в растворе, % (атомн.)
	Железо	Олово				Железо	Олово	
	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>c/a</i>	<i>a</i> _{прив}			
0	2,864	5,820	3,175	0,545	4,755	23,492	107,545	0
10		5,807	3,173		4,747		106,998	0,67
20		5,802	3,171	0,546	4,744		106,746	0,92
30		5,798	3,169		4,740		106,531	1,25

Прецизионное определение периодов решетки олова позволило установить закономерное уменьшение их при увеличении времени контакта с твердым железом, что связано с переходом в расплав олова атомов железа, имеющих меньший атомный радиус, и последующем их фиксировании в виде твердого раствора замещения.

Таким образом, в процессе взаимодействия железа с жидким оловом при температуре пайки 500°C и выдержке до 30 с диффузия олова в железо не имеет места.

При более низких температурах пайки железа оловом можно устойчиво получать «бездиффузионные» спаи при более длительном времени контакта твердой и жидкой фаз. Возможность эта повышается при дозированном энерговлечении, например, при нагреве лазером.

Принципиальная возможность бездиффузионного соединения была показана также для пар железа с медью, алюминием и т. д.

Растворно-диффузионный спай. В результате смачивания основного металла расплавом припоя между ними возникает контакт — необходимое условие развития процессов химического взаимодействия. Одновременно со смачиванием происходит растворение основного металла в расплавленном припое, вследствие чего состав

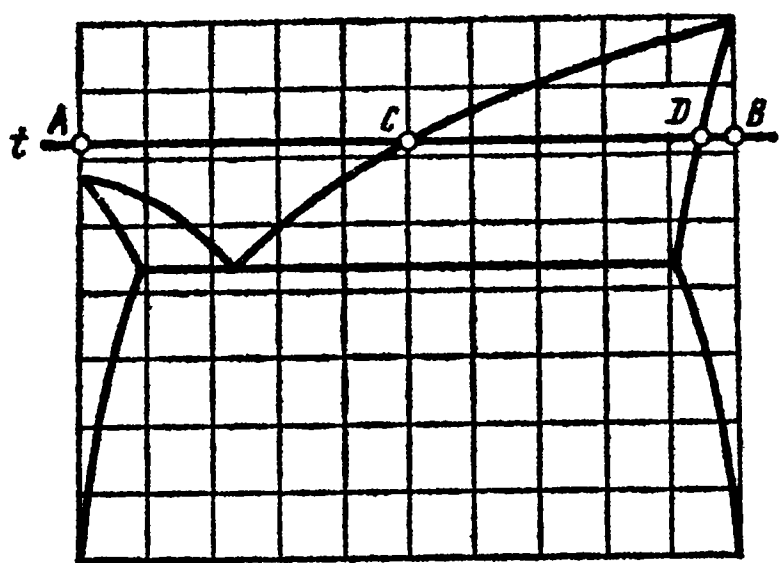


Рис. 3. Схема диаграммы состояния

зоны сплавления меняется, пока не достигнет равновесной концентрации (рис. 3), соответствующей пересечению изотермы температуры пайки с линией ликвидуса (точка C). В процессе растворения одновременно идет диффузия из жидкости в твердую фазу, но поскольку скорость растворения твердого металла в жидком значительно выше, чем диффузия в твердой фазе, то диффузионная зона не образуется. С приближением состава жидкой фазы к равновесию скорость растворения основного металла в ней замедляется, вклад диффузии из жидкой фазы в твердую в массоперенос повышается, поэтому начинает образовываться диффузионная зона.

Если выдержка при температуре пайки достаточна для достижения равновесной концентрации жидкой и твердой фаз, то жидкая часть будет иметь состав, соответствующий пересечению изотермы с ликвидусом, а основной металл по границе с зоной сплавления — с солидусом диаграммы состояния.

Если нагрев при пайке будет прекращен до момента достижения равновесной концентрации жидкой фазы, то средний состав зоны сплавления не будет соответствовать точке C.

После достижения равновесия концентрация жидкой фазы постоянно отвечает точке C, равновесная концентрация твердой фазы в зоне спая (по составу соответствует точке D) достигается за счет насыщения припоем диффузионной зоны и изотермической кристаллизации выделяющегося из расплава твердого раствора. С увеличением выдержки при температуре пайки изотермическая кристаллизация идет до получения во всем объеме зоны сплавления состава, соответствующего насыщенному твердому раствору (точка D). Кинетика этого процесса определяется диффузией. Припой диффундирует в основной металл, вследствие чего в жидкости достигается пересыщение основным металлом. При определенном пересыщении происходит выделение из нее на поверхность основного металла твердого раствора состава, отвечающего точке D. Процесс этот будет протекать до тех пор, пока не израсходуется вся жидкость и не произойдет полная изотермическая кристаллизация.

Равновесие в зоне паяного соединения и в этом случае не достигается. Если нагрев не прекращен, то активно протекает процесс диффузионного выравнивания состава и при очень длительных выдержках — приближение его к составу основного металла.

В итоге процесс взаимодействия основного металла с расплавленным припоем при образовании растворно-диффузионного спая условно можно разграничить на три стадии:

I стадия — интервал концентраций $A — C$, когда ведущим процессом является растворение основного металла в расплавленном припое;

II стадия — интервал концентраций $C — D$, когда между составами жидкой (C) и твердой (D) фаз имеет место динамическое равновесие, происходит изотермическая кристаллизация;

III стадия — интервал концентраций $D — B$, когда жидкости не осталось и протекает диффузия в твердой фазе.

Первая стадия взаимодействия основного металла с расплавом припоя лимитируется или скоростью перехода атомов в пограничный слой, или скоростью их диффузии в расплаве припоя. Если скорость перехода атомов основного металла меньше скорости диффузии их в жидкой фазе, т. е. лимитирует интенсивность растворения, то уравнение скорости растворения в случае взаимодействия чистых металлов имеет вид

$$\frac{dN}{dt} = \omega \rho S - \omega C S, \quad (7)$$

где N — количество атомов, остающихся в расплаве припоя в единице объема (т. е. не выделяющихся вновь на поверхность твердого металла); t — время; ω — вероятность перехода атомов основного металла в расплав припоя; ρ — поверхностная плотность основного металла или число атомов на поверхности единичной площади; S — площадь растворяемого участка основного металла; ω — скорость кристаллизации; C — концентрация основного металла в расплаве припоя.

К моменту насыщения расплава припоя основным металлом между ними установится динамическое равновесие, т. е.

$$\omega \rho - \omega C_{\infty} = 0, \quad (8)$$

где C_{∞} — концентрация насыщения расплава припоя основным металлом.

Подставив в уравнение (7) $CV_{\text{ж}} = N$ и приняв во внимание предыдущее равенство, получим

$$\frac{dC}{dt} = \omega \rho \frac{S}{V_{\text{ж}}} \left(1 - \frac{C}{C_{\infty}} \right), \quad (9)$$

где $V_{\text{ж}}$ — объем расплавленного припоя.

Проинтегрировав это выражение по времени и приняв концентрацию основного металла в расплаве припоя в начальный момент растворения равной нулю, получим уравнение, описывающее кинетику растворения:

$$C = C_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{\omega \rho}{C_{\infty}} \cdot \frac{S}{V_{\text{ж}}} t} \right). \quad (10)$$

Если растворение основного металла лимитируется диффузией в жидкой фазе, уравнение скорости растворения запишется

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{C_{\infty} - C}{\delta^*} S, \quad (11)$$

где D — коэффициент диффузии атомов основного металла в жидком припое; δ — толщина пограничного слоя* в жидком металле, образующегося у поверхности основного металла.

Скорость изменения концентрации основного металла в припое по аналогии с предыдущим

$$\frac{dC}{dt} = \frac{DC_{\infty}}{\delta} \cdot \frac{S}{V_{\text{ж}}} \left(1 - \frac{C}{C_{\infty}} \right). \quad (12)$$

* При анализе процессов растворения различают стадию образования «спокойного» слоя жидкости на границе с твердым металлом и стадию диффузии из пограничного слоя в область конвективных потоков.

Интегрируя по времени с учетом равенства концентрации основного металла в расплаве припоя в начальный момент растворения нулю, получаем кинетическое уравнение процесса растворения, лимитируемого диффузией в жидкой фазе,

$$C = C_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{D}{\delta} \cdot \frac{S}{V_{\text{ж}}} t} \right). \quad (13)$$

В том случае, когда скорость растворения зависит и от скорости перехода атомов основного металла в расплав припоя, и от скорости диффузии в жидкой фазе, кинетическое уравнение примет вид

$$C = C_{\infty} \left(1 - e^{-\alpha \frac{S}{V_{\text{ж}}} t} \right), \quad (14)$$

где $\alpha = \frac{\frac{\omega\rho}{C_{\infty}} \cdot \frac{D}{\delta}}{\frac{\omega\rho}{C_{\infty}} + \frac{D}{\delta}}$ — сомножитель показателя экспоненты, называемый *константой*

скорости растворения, для первого случая равный $\frac{\omega\rho}{C_{\infty}}$ и для второго $\frac{D}{\delta}$.

Как видно из уравнений, во всех трех рассмотренных случаях (10), (13), (14) кинетика растворения характеризуется аналогичными зависимостями, а расплав насыщается по экспоненциальному закону.

Из уравнения (14) следует, что кинетика растворения основного металла в расплавленном припое определяется соотношением физико-химических свойств взаимодействующих металлов, площадью контакта между ними и количеством жидкой фазы.

Согласно экспериментальным данным процесс растворения лимитируется в большинстве случаев диффузией основного металла в жидкой фазе.

Вторая стадия взаимодействия основного металла с расплавом припоя протекает различно в зависимости от соотношения их свойств: металлы, не растворимые в твердом состоянии, имеют ограниченную или непрерывную растворимость.

В простейшем случае, когда основной металл и припой не растворимы в твердом состоянии, вторая стадия будет характерна взаимной диффузией атомов основного металла и расплава припоя и изотермической кристаллизацией на подложку выделяющегося из расплава пересыщающего жидкость основного металла. При образовании ограниченных или непрерывных твердых растворов при изотермической кристаллизации на подложку выделяется сплав основного металла и припоя, по составу (для двухкомпонентной системы) отвечающий точке пересечения изотермы температуры пайки с линией солидуса.

Если исходное количество припоя в зазоре составляет Q , то после насыщения припоя основным металлом количество жидкого раствора составит [33]

$$\frac{Q}{1 - \varphi},$$

где φ — коэффициент, определяющий содержание основного металла в жидком растворе.

Количество растворившегося основного металла в расплаве припоя будет

$$\frac{Q}{1 - \varphi} \varphi. \quad (15)$$

Чтобы связать весь перешедший в расплав припоя основной металл в твердый раствор, потребуется припоя

$$Q_1 = \frac{Q}{1 - \varphi} \varphi (1 - \psi), \quad (16)$$

где ψ — коэффициент, определяющий содержание основного металла в твердом растворе.

В соответствии с этим количество припоя, избыточное по сравнению с необходимым для образования твердого раствора, которое при изотермической кристаллизации диффундирует в основной металл, составит

$$Q_0 = Q - Q_1. \quad (17)$$

Следовательно, время t , в течение которого избыточное количество припоя продиффундирует в основной металл и, таким образом, произойдет изотермическая кристаллизация во всем объеме зоны сплавления (рис. 4), зависит от количества расплавленного припоя, избыточного по отношению к необходимому количеству для образования твердого раствора:

$$Q_0 = \int_{h_2}^{h_1} C_{21}(x, \bar{t}) dx, \quad (18)$$

где C_{21} — концентрация припоя в диффузионной зоне; h_1 и h_2 — текущие координаты соответственно границы диффузионной зоны и межфазной границы основной металл — шов.

Третья стадия взаимодействия при образовании растворно-диффузионного спая протекает по законам диффузии в твердой фазе.

Контактно-реакционный спай. Контактное плавление есть процесс перехода в жидкое состояние разнородных твердых веществ при температурах ниже точек их плавления. Это свойство веществ присуще как металлам, так и неметаллическим материалам. Снижение температуры плавления компонентов связано с особенностями диаграмм состояния взаимодействующих веществ.

В основе контактного плавления лежат диффузионные процессы. Диффузия в твердую фазу при наличии контакта взаимодействующих металлов может продолжаться до тех пор, пока концентрация второго компонента в поверхностном слое не достигнет равновесного предела растворимости при данной температуре. После этого, если температура соответствует эвтектической или минимуму на линии солидуса в системах, образующих непрерывные твердые растворы с минимумом, начинается образование жидкой фазы. С момента ее возникновения дальнейшее взаимодействие контактирующих металлов происходит через слой расплава. Образование твердого раствора в поверхностном слое металлов, находящихся в контакте с жидкой фазой, является процессом, непосредственно подготавливающим плавление этого слоя. Поэтому и после возникновения жидкой фазы контактное плавление рассматривается как процесс плавления твердых растворов, образовавшихся за счет диффузии атомов второго компонента из жидкости и ухода атомов первого компонента в жидкую фазу.

Принято считать, что с момента образования жидкой фазы заканчивается первая стадия контактного плавления, связанная с взаимной диффузией компонентов в твердой фазе и образованием твердых растворов. Эта стадия в общем случае описывается уравнением диффузии.

Вторая стадия контактного плавления определяется растворением твердых металлов в образовавшемся расплаве. При этом одновременно протекают два процесса — образование твердого раствора в поверхностных слоях взаимодействующих металлов за счет диффузии из жидкой фазы и растворение образующегося твердого раствора в жидкой фазе.

В зависимости от природы взаимодействующих металлов и температуры нагрева лимитирующим фактором второй стадии контактного плавления являются процессы, обусловленные или массопереносом в твердую фазу через жидкую прослойку (образование пересыщенных твердых растворов и их последующее плавление), или растворением твердого металла в жидком. При затвердевании расплава, образовавшегося при контактном плавлении двух металлов, возникают два спая, различных по своей

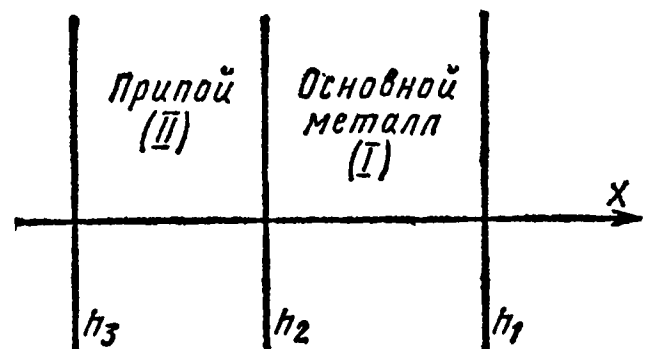


Рис. 4. Расчетная схема процессов образования растворно-диффузионного спая

природе и строению. Если исходить из осредненного значения коэффициентов диффузии в объеме взаимодействующих металлов, не учитывать изменения объема металлов при переходе из твердого состояния в жидкое и изменения объема образующегося сплава по сравнению с объемами металлов, вступивших во взаимодействие, то уравнения диффузии для металлов I и II запишутся в следующем виде (рис. 5):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{21} \frac{\partial C_{21}}{\partial x} \right) = \frac{\partial C_{21}}{\partial t};$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{12} \frac{\partial C_{12}}{\partial x} \right) = \frac{\partial C_{12}}{\partial t},$$

где x — координата; D_{21} и D_{12} — коэффициенты диффузии; C_{21} и C_{12} — концентрация продиффундировавших компонентов в диффузионной зоне; t — время.

Рассматривая процесс контактного плавления относительно единичной площади контакта взаимодействующих металлов, определим долю металлов I и II в единице объема расплава:

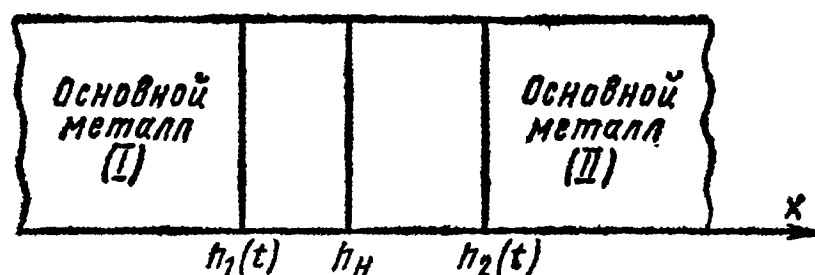


Рис. 5. Расчетная схема процессов образования контактно-реакционного спая

$$\frac{h_H - h_1(t)}{h_2(t) - h_1(t)}; \quad \frac{h_2(t) - h_H}{h_2(t) - h_1(t)},$$

где h_H — значение координаты начального положения стыка контактирующих металлов (до плавления); $h_1(t)$ — текущее положение границы первого металла и жидкой фазы; $h_2(t)$ — текущее положение границы второго металла и жидкой фазы.

Скорость перемещения границ металлов I и II при контактном плавлении зависит от количества продиффундировавшего металла, а также от доли металлов I и II в единице объема жидкой фазы:

$$v_1 = \dot{h}_1(t) = f_1 [C_{21}, h_H - h_1(t), h_2(t) - h_H]; \quad (19)$$

$$v_2 = \dot{h}_2(t) = f_2 [C_{12}, h_H - h_1(t), h_2(t) - h_H], \quad (20)$$

где v_1 и v_2 — скорости перемещения границ твердой и жидкой фаз соответственно металла I и II.

Система (19) и (20) является системой дифференциальных уравнений для определения $h_1(t)$ и $h_2(t)$, причем C_{12} и C_{21} в выражения (19) и (20) входят при условии, что $x = h(t)$, т. е.

$$C_{12} = C_{12} [h_2(t), t], \quad C_{21} = C_{21} [h_1(t), t].$$

Диспергированный спай. По преобладающему воздействию на твердые металлы внешние среды могут быть [17, 18]:

неактивными, практически не влияющими на механические свойства металлов (воздух, большинство углеводородов);

поверхностно-активными, к которым относятся химически неактивные или малоактивные среды, такие как растворы поверхностно-активных веществ в углеводородах и иногда в воде [10, 26, 27];

диффузионно-воздействующими (газы, растворимые или поглощаемые твердыми металлами, жидкие металлы) [39];

химически активными, вызывающими явления коррозии [42].

Это деление условно, так как характер и интенсивность воздействия на твердый металл существенно меняются в зависимости от температуры, продолжительности контакта, состояния поверхности твердого тела, наличия примесей как в окружающей среде, так и в основном металле и т. д.

Действие активных сред начинается с адсорбции на границе раздела. Взаимодействие с паяемым металлом или проникновение в его объем является уже вторичным процессом.

При пайке воздействие жидкометаллической среды на паяемые металлы является определяющим. В зоне шва могут происходить изменения физико-механиче-

ских свойств основного металла, связанные с эффектом пластифицирования, адсорбционного понижения прочности, диспергирования, образования твердых растворов и соединений в результате гетеродиффузии, растворения и т. д. [19, 40, 56].

Воздействие на паяемые металлы расплавов более легкоплавких металлов осуществляется через поверхность, поэтому состояние ее, наличие на ней загрязнений, окисных пленок и т. п., а также состояние предповерхностных слоев — наличие остаточных напряжений, наклепа, различных дефектов от субмикроскопических до микроскопических имеет очень большое значение. Если на поверхности основного металла имеются пленки с неметаллической связью, то они затрудняют доступ расплава к твердому металлу и ухудшают условия взаимодействия между ними. После механической обработки резанием воздействие расплава усиливается. Наоборот, если основной металл полировался или накатывался, что приводит к уменьшению поверхностных дефектов, то воздействие расплава снижается.

Эффект понижения прочности связан с уменьшением поверхностной энергии твердых металлов и имеет место в первую очередь в тех случаях, когда взаимодействующие металлы дают диаграмму состояния эвтектического типа, а расплавленный металл не вступает в химическое взаимодействие с твердым, растворяясь в нем в весьма небольших количествах. Эффект снижения прочности твердых металлов наблюдается и тогда, когда основной металл и расплавленный припой не обладают взаимной растворимостью [30, 32]. Роль межзеренных границ в этом явлении остается определяющей, поскольку в условиях снижения межфазной энергии под действием расплава границы зерен являются наиболее ослабленным местом. Это связано с тем, что граница зерен обладает значительным избытком свободной энергии ввиду нескомпенсированности межатомных сил. Поэтому на поверхностях с избыточной свободной энергией происходит более активная адсорбция расплава, что приводит к снижению прочности.

При образовании диспергированного спая процесс измельчения основного металла под действием расплавленного припоя протекает в условиях, характеризующихся высокой температурой процесса; ограниченным количеством жидкой фазы; активным процессом миграции расплавленного припоя в основной металл.

В этих условиях длительность процесса диспергирования наряду с физико-химическими свойствами основного металла и припоя лимитируется количеством жидкой фазы в шве. Максимальная длительность определится временем заполнения зазора дисперсными частицами, имеющими различную дисперсность. Зона сплавления может представлять коллоидный раствор основного металла в расплаве припоя или в расплав припоя в процессе диспергирования могут переходить частицы сравнительно крупных размеров.

Если принять, что диспергирование основного металла при формировании спаев заканчивается образованием отдельных изолированных зерен со средним диаметром d и рассматривается получение спая между металлами I (расплав) и II (основной металл), то можно провести расчет кинетики диспергирования.

Концентрация металла I в диффузионной зоне C_{12} определится из уравнения (рис. 6)

$$\frac{\partial C_{12}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_{12}}{\partial x^2}.$$

Считаем процесс диспергирования законченным, когда весь зазор будет заполнен дисперсными частицами (шариками), образующими кубическую упаковку. Тогда объем шариков будет составлять $\frac{\pi}{6}$, а объем расплава $1 - \frac{\pi}{6}$ всего объема, образовавшегося после заполнения зазора.

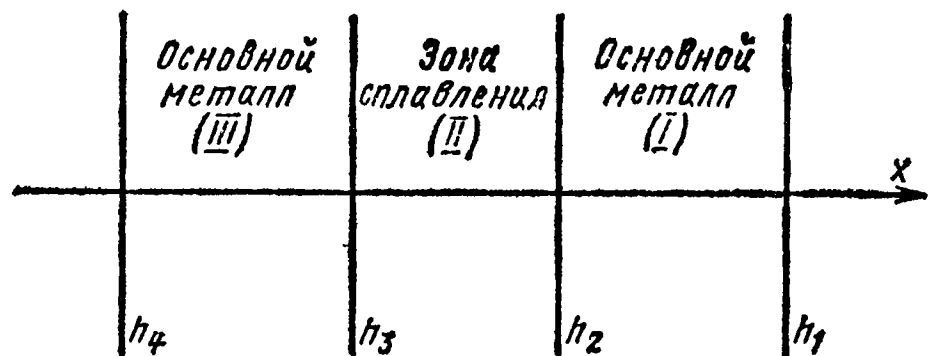


Рис. 6. Расчетная схема процессов образования диспергированного спая

Так как первоначальный единичный объем металла I V_0 нам известен, то

$$V_0 - \frac{1}{\rho_1} \int_{h_2(t^*)}^{h_3} C_{12}(x, t^*) dx = \left(1 - \frac{\pi}{6}\right) V_1, \quad (21)$$

где t^* — время протекания процесса диспергирования; V_1 — единичный объем по ширине зоны сплавления после диспергирования (заполнения зазора дисперсными частицами); ρ_1 — плотность металла I.

Объем V_1 можем вычислить: $\frac{V_1}{d^2} = h_2(t^*) - h_1$,

откуда

$$V_1 = d^2 [h_2(t^*) - h_1]; \quad (22)$$

подставляя выражение (22) в (21), получим

$$V_0 - \frac{1}{\rho_1} \int_{h_2(t^*)}^{h_3} C_{12}(x, t^*) dx = \left(1 - \frac{\pi}{6}\right) d^2 [h_2(t^*) - h_1]. \quad (23)$$

Если скорость образования дисперсных частиц известна, то уравнение (23) позволяет определить время диспергирования, а если время диспергирования известно, то можно оценить ширину шва, образовавшегося после диспергирования.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПАЙКЕ

СМАЧИВАНИЕ И РАСТЕКАНИЕ ПРИПОЕВ

Согласно первому закону капиллярности (формула Лапласа)

$$p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где p_1 и p_2 — давление с вогнутой и выпуклой стороны поверхности жидкости соответственно; $\sigma_{1,2}$ — поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой средой; R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхности.

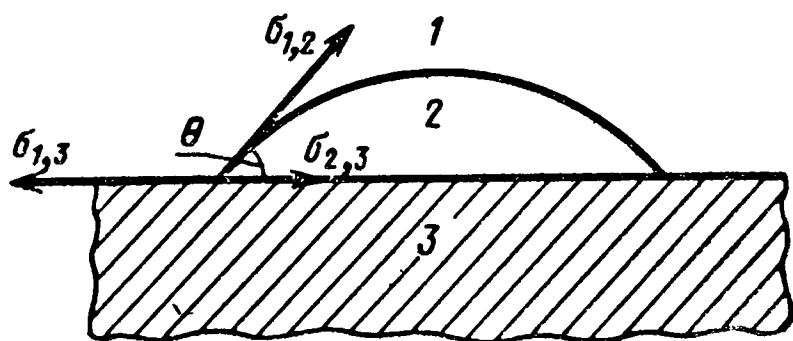


Рис. 7. Схема равновесия сил поверхностного натяжения капли жидкости на поверхности твердого тела:

1 — газ; 2 — жидкость; 3 — твердое тело

натяжения в точке на границе трех фаз. Этой границей является периметр смачивания (рис. 7):

$$\sigma_{1,3} = \sigma_{2,3} + \sigma_{1,2} \cos \theta,$$

где $\sigma_{1,3}$ — поверхностное натяжение между твердым телом и газовой средой, действующее на каплю по периметру ее основания; $\sigma_{2,3}$ — поверхностное натяжение жидкости на границе с твердым телом.

Из формулы Лапласа следует, что поверхностный слой жидкости, имеющий кривизну, оказывает добавочное давление по сравнению с тем, которое он испытывает при наличии плоской поверхности. Этим добавочным давлением обусловлены главным образом все капиллярные явления.

При растекании капли жидкости на плоской поверхности твердого тела условия ее равновесия выражаются в виде равновесия векторов сил поверхностного

Это уравнение является вторым законом капиллярности (равенство Юнга), из которого следует

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (24)$$

Косинус угла θ , называемый коэффициентом смачивания, характеризует смачивающую способность жидкости.

Анализ экспериментальных данных, полученных двумя различными методами — методом определения краевого угла и методом определения критического угла наклона поверхности исследуемого металла, при котором капля жидкости начинает скатываться, показал справедливость последнего уравнения [31].

Как первое, так и второе уравнение капиллярности получены исходя из предположения, что равновесие материального объекта рассматривается как равновесие всех приложенных к нему сил.

Поскольку при температуре пайки припой находится в жидком состоянии, то на них можно распространить первый и второй законы капиллярности. Однако при этом необходимо иметь в виду, что эти законы выведены для жидкостей, не взаимодействующих с твердым телом. В процессе же пайки происходит активное взаимодействие между основным металлом и расплавленным припоем, поэтому капиллярные явления, протекающие при этом, более сложны и лишь приближенно описываются приведенными уравнениями.

Растекание расплавленного припоя по поверхности основного металла определяется многими факторами. Среди них наибольшее влияние оказывают характер взаимодействия в контакте основной металл — припой, вязкость расплава припоя, жидкотекучесть. Последнее особое значение приобретает, когда припой имеет широкий интервал кристаллизации, а пайка им происходит при температурах, лежащих ниже температуры ликвидуса. Наличие в расплаве в этом случае твердой фазы, строение выпадающих кристаллов, характер их расположения резко меняют жидкотекучесть припоя.

Механизм растекания припоя связан с взаимодействием расплава припоя и его парообразной фазы с основным металлом, с поверхностной диффузией расплавленного припоя, с капиллярным течением последнего и т. д. При растекании указанные процессы имеют место в сочетании, определяемом соотношением физико-химических свойств припоя и основного металла, а также условиями пайки.

Растекание расплава припоя, как и всякой жидкости по поверхности твердого тела, определяется соотношением сил адгезии припоя к поверхности основного металла и когезии, характеризуемой силами связи между частицами припоя.

Работа адгезии определяется свободной поверхностной энергией, освобождающейся при смачивании твердого тела жидкостью:

$$A_{адг} = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3}. \quad (25)$$

Полное растекание припоя по поверхности основного металла имеет место при краевом угле $\theta = 0$.

Когезия частиц припоя оценивается работой, необходимой для разрыва жидкости и образования двух новых поверхностей:

$$A_{ког} = 2\sigma_{1,2}.$$

Растекание капли расплава припоя по основному металлу произойдет, если работа адгезии к поверхности последнего будет равна или больше работы когезии частиц припоя. Разность между ними называют коэффициентом растекания:

$$K = A_{адг} - A_{ког} = \sigma_{1,2} (1 + \cos \theta) - 2\sigma_{1,2} = \sigma_{1,2} (\cos \theta - 1). \quad (26)$$

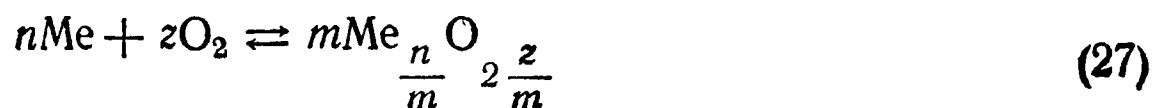
Следовательно, растекаемость расплавленного припоя по поверхности основного металла определяется его поверхностным натяжением и краевым углом смачивания. Зависимость между краевым углом смачивания и поверхностным натяжением имеет сложный характер. Так, например, для сплавов свинец-олово в интервале 60—80% содержания последнего поверхностное натяжение уменьшается по линейному закону. Краевой же угол смачивания сплавами свинец-олово стали ШХ15 в этом интервале остается приблизительно постоянным [46].

С повышением температуры пайки для чистого олова площадь растекания остается постоянной, а для сплавов свинец-олово эвтектического состава растет, если перегрев не превышает 40—50° С. Дальнейший перегрев сплава ведет к снижению растекаемости, что связано с усилением взаимодействия между припоем, флюсом, основным металлом и окружающей газовой средой.

Увеличение времени выдержки при температуре пайки до определенного предела ведет к уменьшению краевого угла смачивания. Дальнейшая выдержка не оказывает влияния на его изменение [15, 16, 28]. На растекаемость припоев большое влияние оказывает их компонентный состав. Например, легирование припоев системы медь — золото палладием обеспечивает полное смачивание при меньшем перегреве [54]

Растекание припоя по основному металлу при пайке в отдельных случаях происходит в две стадии. Первая соответствует быстрому растеканию под действием сил поверхностного натяжения, вторая характеризуется медленным растеканием [50]. Такое вторичное растекание имеет место, например, при пайке меди припоями, содержащими от 30 до 70% олова. Иногда на второй стадии площадь, образованная растекшимся припоем, может несколько уменьшаться или эффект вторичного растекания совершенно прекратится. Данное обстоятельство связано с физико-химическими свойствами взаимодействующей пары и температурой. Природа этого явления связана с образованием между основным металлом и припоем сплава, обладающего более высокой смачивающей способностью, чем припой в исходном состоянии. Так, припой ПОС-40 при температуре 250° С имеет характерное вторичное растекание, при 300° С оно полностью отсутствует. На растекание припоев при пайке в вакууме большое влияние оказывает разрежение в камере пайки.

Если металл и его окисел находятся в системе взаимодействующих веществ в виде насыщенных паров, то константа равновесия реакции



определится из соотношения

$$K_p = \frac{p_{\text{Me}}^n p_{\text{O}_2}^z}{p_{\text{Me}_{\frac{n}{m}\text{O}_{\frac{z}{m}}}}^m}, \quad (28)$$

где $p_{\text{Me}}, p_{\text{O}_2}, p_{\text{Me}_{\frac{n}{m}\text{O}_{\frac{z}{m}}}}$ — парциальные давления паров металла, кислорода и паров окисла.

Когда металл и его окисел находятся в конденсированном состоянии, константа равновесия

$$K_p = p_{\text{O}_2}^z, \quad (29)$$

т. е. будет постоянной, если при неизменной температуре металл и окисел представляют собой смесь насыщенных растворов. При ненасыщенных растворах константа равновесия будет функцией концентрации в соответствии с правилом фаз. Из последнего равенства следует, что при постоянной температуре равновесие между металлом и его окислом определяется парциальным давлением кислорода. Если парциальное давление кислорода в зоне пайки будет меньше равновесного при данной температуре парциального давления кислорода, образующегося при разложении окисла, то последний будет удаляться с поверхности основного металла и припоя. Следовательно, с повышением степени вакуумирования при постоянной температуре парциальное давление кислорода в камере пайки будет снижаться, что должно способствовать диссоциации окислов и улучшению условий смачивания основного металла расплавленным припоем. Результаты экспериментов свидетельствуют о другом [47]. В табл. 3 приведены сравнительные данные о температуре начала растекания различных припоев по меди в вакууме.

3. Температура плавления и начала растекания припоев по меди

Припой	Температура плавления, °С	Система медь — припой	Температура начала ра- стекания, °С
Галлий	29,8	Ограниченные твердые растворы . . Эвтектические смеси Ограниченные твердые растворы . . Не взаимодействуют	525
Индий	156,2		405
Олово	231,9		430
Висмут	271,3		515
Кадмий	320,9		500
Свинец	327,3		545
Примечание. Вакуум 10 ⁻² мм рт. ст.			

Зависимость температуры начала растекания галлия, индия, олова, кадмия, свинца и висмута по меди от степени вакуумирования показана на рис. 8. Наименьшая температура смачивания меди соответствует разрежению $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Площадь растекания для рассматриваемых, за исключением кадмия, припоев по меди при температуре 850°C имеет максимальное значение также при разрежении $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. (рис. 9). Снижение площади растекания кадмия с повышением степени разрежения связано с его испарением.

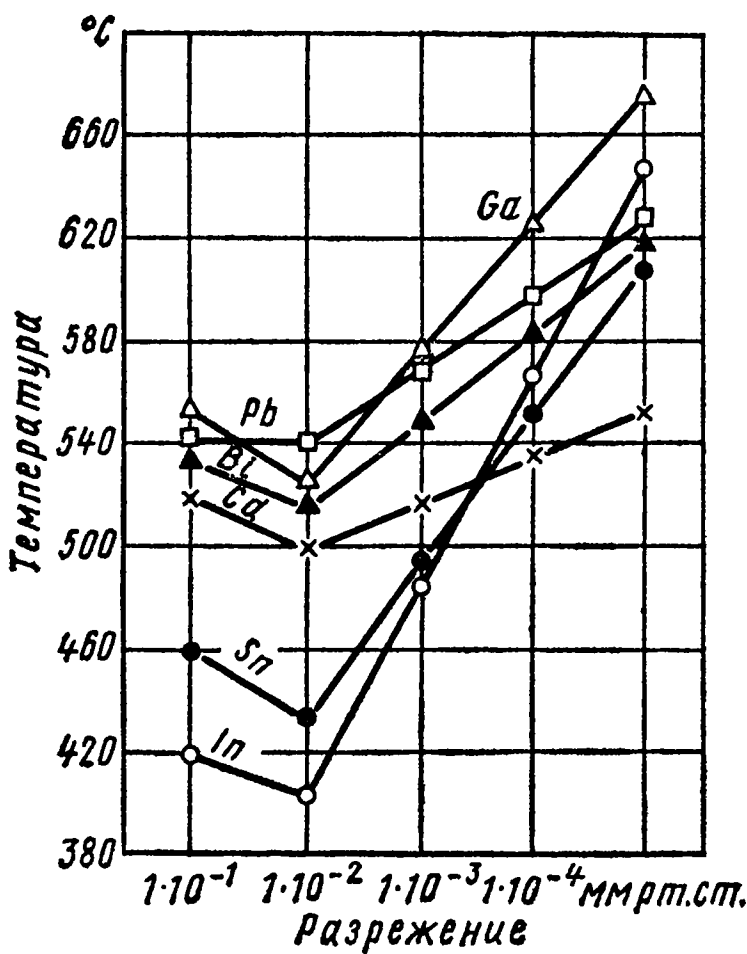


Рис. 8. Температура начала растекания металлов по меди в зависимости от степени вакуумирования

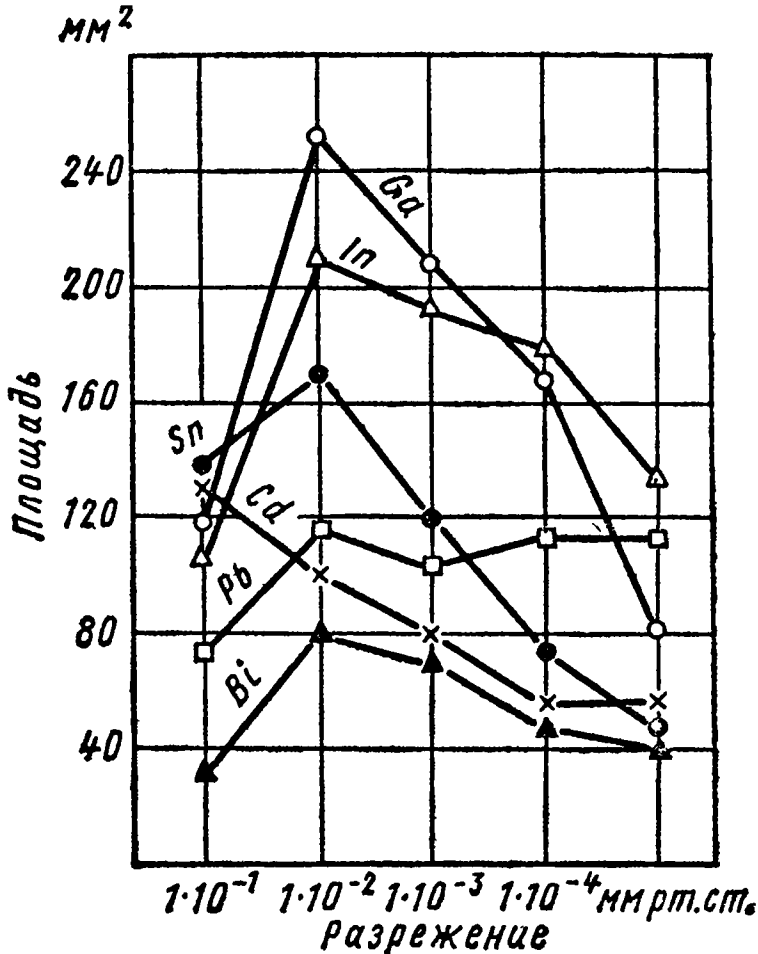


Рис. 9. Площадь растекания металлов по меди при 850°C в зависимости от степени вакуумирования

При снижении температуры пайки указанная зависимость площади растекания от степени вакуумирования сохраняется.

Применение в качестве основного металла армко-железа не приводит к ее изменению.

Установленная закономерность влияния вакуума на температуру смачивания и интенсивность растекания припоев по основному металлу может быть объяснена своеобразием процесса взаимодействия остаточных газов в камере пайки с основным металлом и расплавом припоя. Известно, что содержащиеся в камере нагрева газы обладают различной, в зависимости от парциального давления, адсорбируемостью на металлах. При определенном, своем для каждого газа, парциальном давлении достигается максимальная адсорбируемость, соответствующая наибольшему снижению

поверхностной энергии твердого и жидкого металлов. При этом давлении происходит наибольшее снижение межфазной энергии на границе основной металл — расплав припоя, отвечающее наименьшей температуре смачивания и максимальной площади растекания припоя.

При постоянной степени вакуумирования увеличение температуры вначале вызывает рост площади растекания. Дальнейшее повышение температуры, особенно в случае образования между основным металлом и припоем растворов, приводит к резкому снижению растекания.

Зависимости площади растекания по меди и армко-железу навесок припоев при различных температурах пайки и разрежении $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. показаны соответственно на рис. 10 и 11. Для индия и галлия при растекании по меди имеет место максимум площади растекания, что связано с образованием между основным металлом

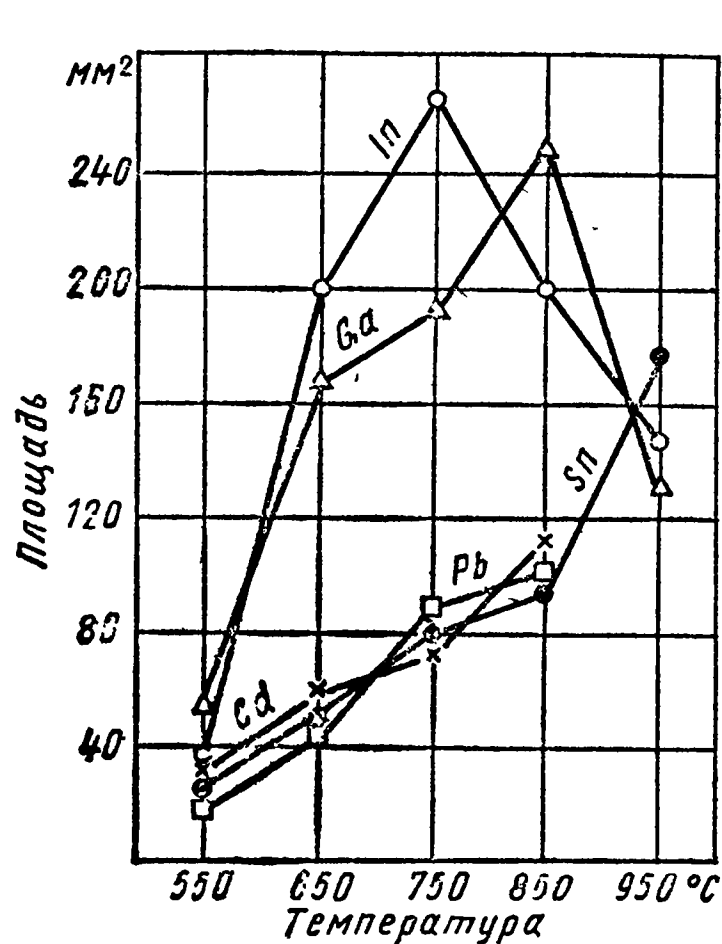


Рис. 10. Площадь растекания индия и олова по меди в зависимости от степени вакуумирования и температуры

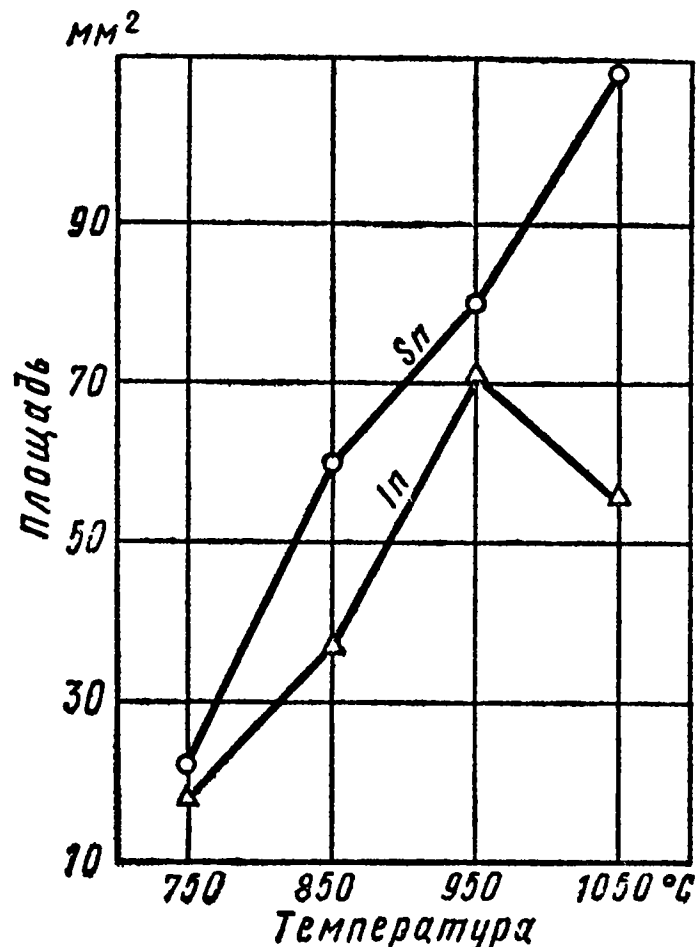


Рис. 11. Площадь растекания индия и олова по армко-железу в зависимости от степени вакуумирования и температуры

и припоем растворов. Увеличение площади растекания олова по меди связано с его вторичным растеканием. В вакууме $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. в интервале температур 650—950° С вторичное растекание по меди имеют не все припои. Если для индия вторичное растекание проявляется отчетливо, то для галлия и олова оно едва заметно, а для свинца, висмута и кадмия совсем не наблюдается. Вторичное растекание, как показали эксперименты, вызывается образованием в процессе взаимодействия припоя с основным металлом сплава, обладающего более высокой способностью растекаться, чем припой в исходном состоянии. Это явление связано с распространением наиболее легкоплавкой фазы припоя по границам зерен основного металла.

Зависимость площади растекания индия по армко-железу (рис. 11) имеет тот же характер, что и по меди, но максимальное растекание наблюдается не при 750° С, а при 950° С [12].

В условиях пайки армко-железа высокотемпературными припоями установленная закономерность изменения площади растекания от степени разрежения сохраняется (рис. 12). Механические испытания образцов из армко-железа, паянных медью, при различных степенях разрежения показали, что при вакууме 10^{-2} мм рт. ст. свойства не снижаются, а в отдельных случаях наблюдается более высокая прочность соединений (рис. 13).

Замена воздушной среды вакуумируемого пространства аргоном исключает возможность взаимодействий твердого и жидкого металлов с активными газами атмосферы воздуха и, следовательно, не происходит снижения их поверхностной энергии.

Условия растекания припоев в камере пайки в этом случае не меняются с изменением степени разрежения.

Прочность связи кислорода с металлами увеличивается в направлении Ag—Cu—Ni—Fe , поэтому для оценки влияния на процесс растекания припоев устойчивости окисной пленки на основном металле в качестве последнего было исследовано серебро. Окислы серебра в атмосфере воздуха разлагаются уже при 200°C . При более высоких температурах на поверхности серебра не будет окисной пленки, исключается образование и слоя адсорбированного кислорода. Поэтому площадь растекания припоев в камере пайки, предварительно заполненной воздухом, не должна зависеть от степени вакуумирования. Эксперименты показали, что растекание индия и олова по серебру при 500°C не зависит от степени разрежения.

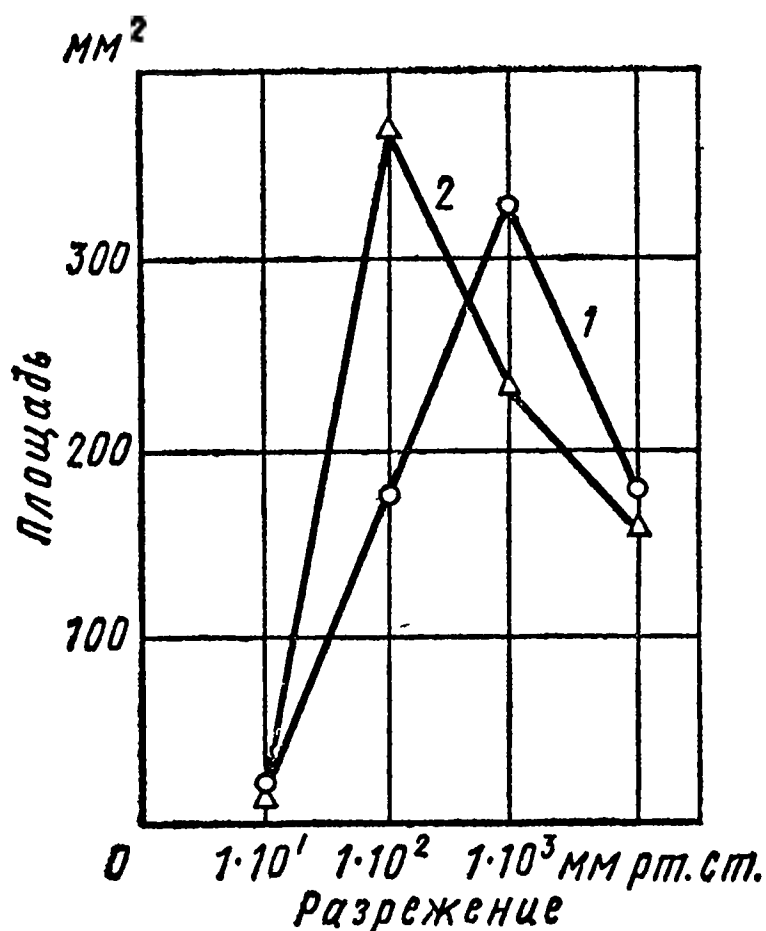


Рис. 12. Площадь растекания индия (1) и припоя ПСр 72 (2) по никелю марки НП-2 в зависимости от степени вакуумирования. Температура пайки 850°C , выдержка 5 мин

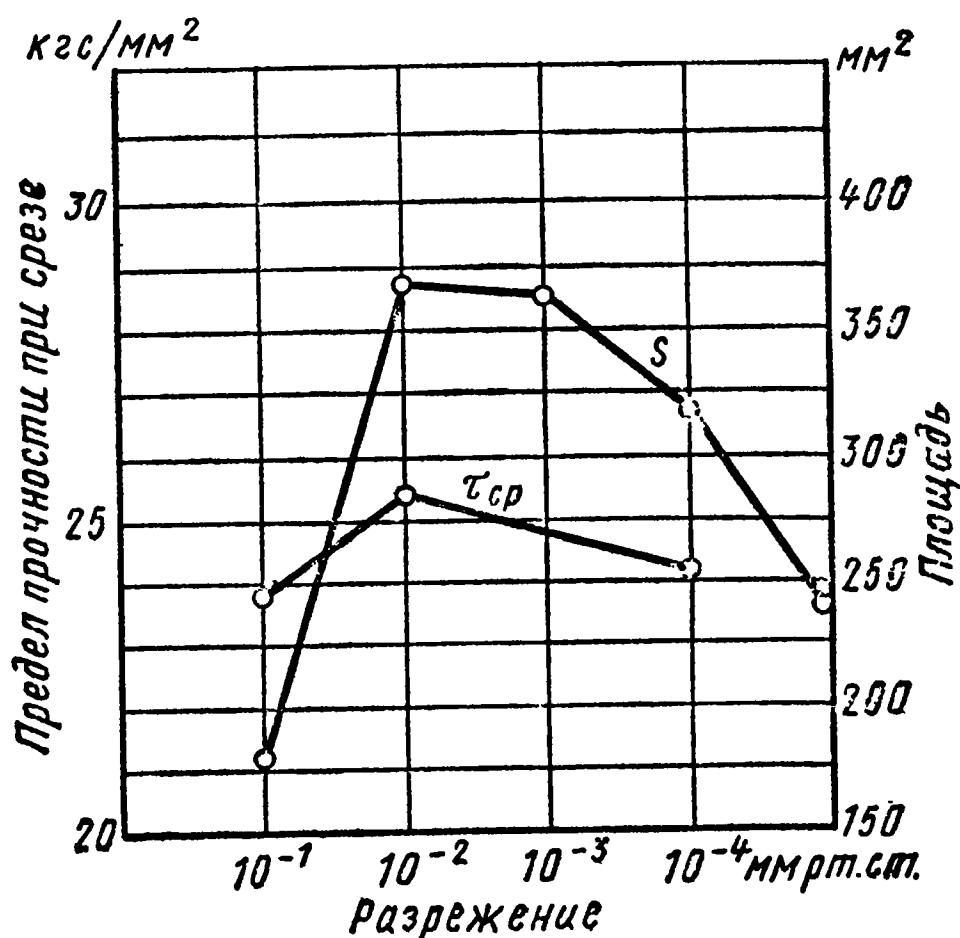


Рис. 13. Площадь растекания (S) и прочность соединения на срез ($\tau_{ср}$) при пайке армко-железа медью в зависимости от степени вакуумирования. Температура пайки 1120°C , выдержка 1 мин

Экспериментальные данные показывают, что влияние на процесс растекания припоев в вакууме оказывает совокупность ряда факторов. Основными из них являются состав паяемого металла и припоя, состав и парциальное давление газов в камере пайки.

При смачивании серебра в вакууме адсорбированный слой при температуре пайки не образуется, расплав припоя взаимодействует непосредственно с металлом подложки. Поэтому снижения межфазной энергии в результате адсорбции газов на границе твердой и жидкой фаз не происходит.

При применении в качестве подложки благородных металлов на границе твердой и жидкой фаз будет протекать взаимодействие окисной пленки с расплавом припоя.

Поскольку окисная пленка на поверхности меди состоит из закиси меди Cu_2O и окиси меди CuO , то в случае смачивания меди расплавами указанных выше металлов на границе твердого и жидкого металлов возможны реакции

- 1) $\text{CuO}_{(ТВ)} = [\text{Cu}]_{\text{Me}} + [\text{O}]_{\text{Me}}$;
- 2) $\text{Cu}_2\text{O}_{(ТВ)} = 2 [\text{Cu}]_{\text{Me}} + [\text{O}]_{\text{Me}}$;
- 3) $\text{CuO}_{(ТВ)} + \text{Me}_{(ТВ, Ж)} = \text{MeO}_{(ТВ)} + \text{Cu}_{(ТВ, Ж)}$;
- 4) $\text{Cu}_2\text{O}_{(ТВ)} + \text{Me}_{(ТВ, Ж)} = \text{MeO}_{ТВ} + 2\text{Cu}_{(ТВ, Ж)}$;
- 5) $\text{CuO}_{(ТВ)} + \text{Me}_{(Ж)} = [\text{MeO}]_{\text{CuO}} + [\text{Cu}]_{\text{Me}}$;
- 6) $\text{Cu}_2\text{O}_{(ТВ)} + \text{Me}_{(Ж)} = [\text{MeO}]_{\text{Cu}_2\text{O}} + 2 [\text{Cu}]_{\text{Me}}$,

где Me — металл, применяемый в качестве припоя; $[Cu]_{Me}$ — раствор меди в Me ; $[MeO]_{Cu_2O}$ — раствор окисла Me в окиси меди; $[MeO]_{Cu_2O}$ — раствор окисла Me в закиси меди.

Для обеспечения смачивания и растекания припоя по основному металлу наибольший интерес представляют реакции 3 и 4.

Термодинамическая оценка вероятности взаимодействия окиси и закиси меди с металлами Bi , Pb , Sn и Cd показала, что реакции взаимодействия между окисью и закисью меди и металлами, применяемыми в качестве припоев, возможны, начиная с момента смачивания ими основного металла (рис. 14 и 15).

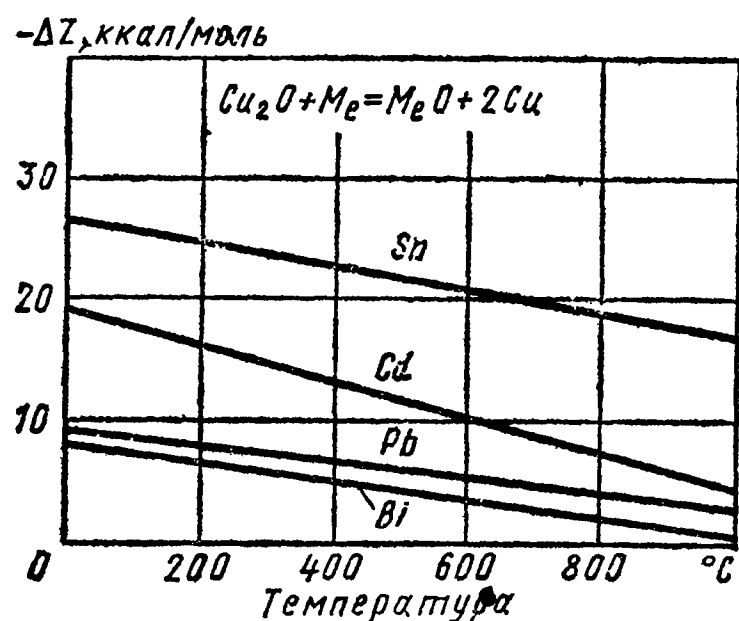


Рис. 14. Изменение изобарно-изотермического потенциала (ΔZ) реакций между закисью меди и припоями в зависимости от температуры

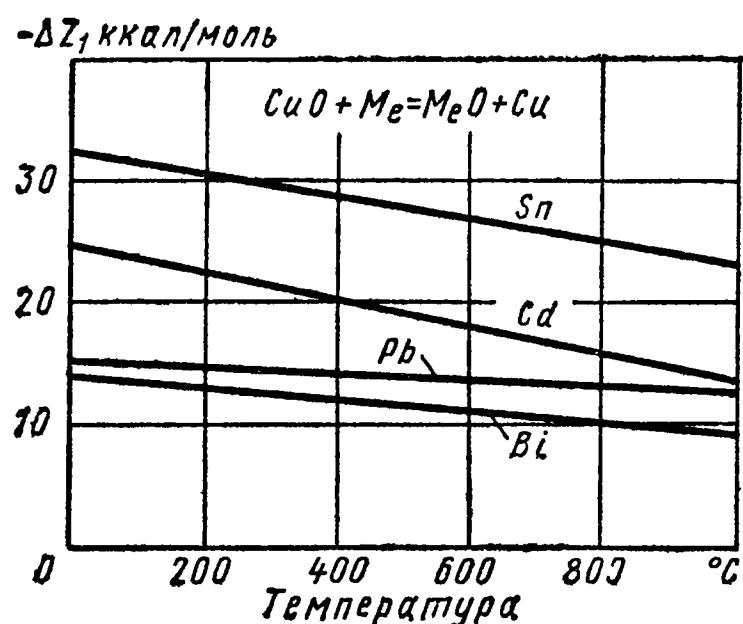


Рис. 15. Изменение изобарно-изотермического потенциала (ΔZ_1) реакций между окисью меди и припоями в зависимости от температуры

Термодинамическая последовательность взаимодействия выражается в виде ряда Sn , Cd , Pb , Bi , что согласуется и с результатами экспериментов.

При взаимодействии расплава припоя с окисной пленкой на основном металле образование химической связи между атомами металлов и окислами становится возможным, когда атомы металла передают свои электроны ионам кислорода окисла в процессе диссоциации последнего. Процесс диссоциации окислов сопровождается разрывом связей кислород — металл. Кислород, забирая электроны, образует в жидком металле комплексы $O^{--}Me^{++}$, локализуя на себе валентные электроны разорванных химических связей.

КАПИЛЛЯРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПРИПОВ

Опытами установлено, что прямой зависимости между растеканием и течением припоя в зазоре нет. Так, припой на алюминиевой основе хорошо растекается по поверхности сплава $AMg6$, но не затекает в капиллярный зазор. С другой стороны, припой системы никель — хром — кремний плохо растекается по поверхности стали $X18H9T$ и сплава $ЭИ437Б$, но хорошо затекает в капиллярные зазоры [25]. Это связано с характером взаимодействия расплавленного припоя с основным металлом. В капиллярном зазоре расплавленный припой интенсивно насыщается компонентами основного металла, что ведет к потере способности течь. На различие в процессах растекания и течения в зазоре может влиять наличие в расплаве отдельных кристаллов и кристаллических образований. Если размеры их в расплаве будут превышать величину капиллярного зазора, то течения припоя в нем не будет. Наряду с этим течение припоя в зазоре зависит еще от целого ряда факторов. При определении характера и глубины затекания низкотемпературных припоев системы олово — свинец в зазор между стальными пластинами при флюсовании водным раствором хлористого цинка установлено, что чистое олово затекает на глубину, равную трети глубины затекания сплавов олово — свинец, содержащих 20—60% олова. При этом глубина затекания меняется в зависимости от состава флюса. Так, для припоя, состоящего из равных долей олова и свинца при переходе от неорганического флюса на основе хлористого цинка на органические (молочная кислота, смеси смол), глубина затека-

ния между стальными пластинками снижается приблизительно в 10 раз. При пайке погружением в расплавленные припои на течение в зазоре большое влияние оказывает предварительный подогрев деталей. При низкотемпературной пайке в газовых средах капиллярное течение припоев в сильной степени зависит от природы и количества применяемого активирующего компонента газовых сред.

При изучении капиллярного течения припоев в зазоре пользуются, с одной стороны, статической теорией, рассматривающей форму жидкости, находящейся на поверхности твердого тела, в условиях наименьшей свободной поверхностной энергии системы и, с другой — динамической, рассматривающей течение жидкостей. На основе первой теории можно оценить силы, под действием которых происходит течение припоев в процессе пайки. Вторая теория применяется для установления причин, от которых зависит заполнение шва припоем.

Согласно статической теории избыточное давление может быть выражено через высоту столба жидкости над заданным уровнем и через его плотность. Например, если жидкость течет по капилляру диаметром d (рис. 16), то высота его поднятия над заданным уровнем поверхности ванны, согласно первому уравнению капиллярности, будет

$$h = \frac{4\sigma_{1,2} \cos \theta}{d\rho g}, \quad (30)$$

где ρ — плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести.

В случае капиллярного течения между двумя параллельными пластинками (рис. 17) высота поднятия жидкости определится из тех же соотношений:

$$h = \frac{2\sigma_{1,2} \cos \theta}{a\rho g}, \quad (31)$$

где a — величина зазора.

В обоих случаях, если вес жидкости, находящейся в зазоре, превышает результирующую капиллярных сил, то эти силы не могут удержать ее, и она будет опускаться до такого уровня, при котором вес ее уравновешивается капиллярными силами. В условиях пайки это приводит к тому, что участки паяного шва, расположенные выше определенного уровня, остаются не заполненными припоем, и, следовательно, соединение оказывается пропаянным не по всей площади.

Согласно динамической теории, скорость течения расплавленного припоя зависит от нахлестки и зазора, разности давлений на входе и выходе из зазора, а также от вязкости припоя [49, 52]. Поскольку динамическая теория не учитывает наличия взаимодействия припоя с основным металлом в процессе пайки, а исходит из условия непрерывного движения в капиллярном зазоре невзаимодействующих жидкостей, то результаты ее значительно отличаются от получаемых экспериментально.

При горизонтальном расположении шва, например, глубина затекания припоя в зазор, согласно динамической теории, определяется зависимостью [49]

$$l = \sqrt{\frac{\sigma_{1,2} a}{3\eta}} t, \quad (32)$$

где η — вязкость припоя; t — время, необходимое для затекания припоя на глубину l .

По формуле между глубиной затекания припоя и величиной зазора прямая зависимость, которая на практике не соблюдается. При прочих равных условиях

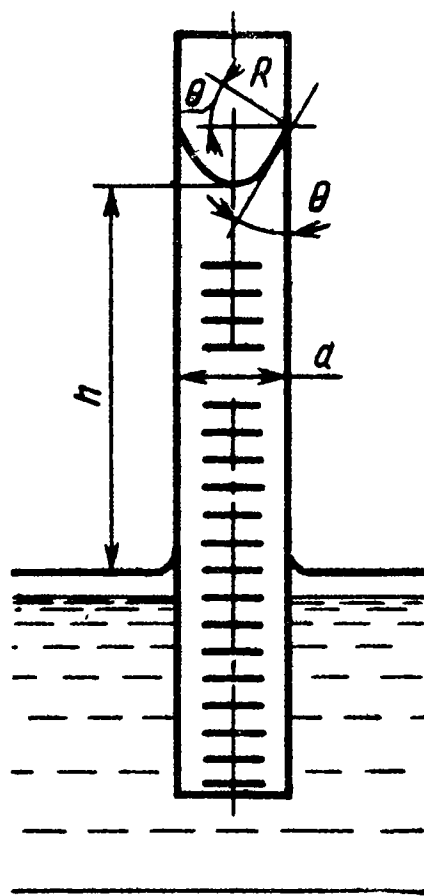


Рис. 16. Схема поднятия жидкости по капилляру круглого сечения

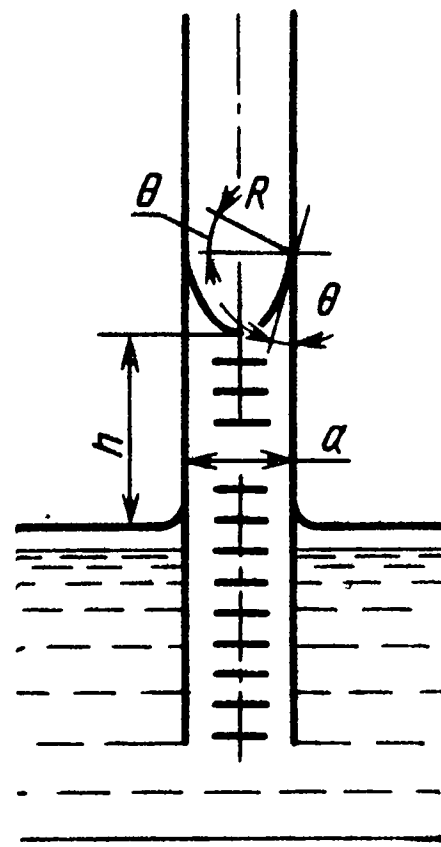


Рис. 17. Схема поднятия жидкости между параллельными пластинками

наибольшая глубина затекания припоя в зазор будет при оптимальном значении последнего. Кроме того, глубина затекания, согласно выведенному уравнению, не ограничивается, если имеется расплав припоя. В действительности же за счет растворения основного металла в расплаве припоя свойства его могут настолько изменяться, что течение в зазоре прекратится, несмотря на то, что имеется избыток припоя.

Если при горизонтальном расположении шва, согласно динамической теории, припой может течь беспределно при наличии перепада давления, то в случае вертикального расположения течение припоя прекращается, как только вес столба его уравнивает разность давлений. В этом случае перепад давления станет равным нулю:

$$\frac{2\sigma_{1,2}}{a} - \rho gh = 0,$$

откуда максимальная высота подъема припоя составит

$$h_{\max} = \frac{2\sigma_{1,2}}{\rho ga}. \quad (33)$$

Из последней зависимости следует, что с уменьшением зазора максимальная высота подъема припоя будет непрерывно расти, что на практике не соблюдается.

Течение расплавленных припоев в реальных условиях пайки отличается от течения идеальных жидкостей. Это отличие состоит в том, что припой, как правило, являются многокомпонентными сплавами, которые при пайке вступают в сложные взаимодействия с основным металлом. В процессе течения их в зазоре происходит растворение в них основного металла, флюса, газовых сред. Известно, что поверхностные свойства жидких растворов зависят от характера распределения в объеме и в поверхностном слое растворенных элементов. Если взаимодействие между атомами растворенного вещества и атомами растворителя меньше, чем взаимодействие между атомами растворителя, то растворенные вещества будут преимущественно выталкиваться из объема на поверхность. Накопление их в поверхностном слое приведет к уменьшению атомного взаимодействия, в результате чего поверхностное натяжение с ростом концентрации растворенных веществ падает. С другой стороны, под действием диффузии во всех участках раствора концентрация стремится стать равномерной. Равновесие в распределении элементов в объеме и в поверхностных слоях жидкости достигается в результате действия этих противоположных процессов.

Связь величины изменения поверхностного натяжения с характером распределения растворенного вещества в объеме и в поверхностных слоях может быть описана уравнением Гиббса

$$\Gamma = - \frac{C}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial C} \right)_T, \quad (34)$$

где Γ — избыток растворенного вещества в поверхностном слое; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; C — концентрация растворенного вещества.

Количество растворенного вещества в поверхностном слое зависит от концентрации его в объеме и температуры. Для припоев зависимости изменения поверхностного натяжения от распределения в них растворенных веществ не исследованы, но и в случае их исследования вычисление поправки к величине σ не дало бы удовлетворительных результатов, если величину поднятия припоя в зазоре определять по первому закону капиллярности, который не учитывает условий течения припоев. В реальных условиях:

в процессе заполнения зазора происходит взаимодействие припоя с основным металлом, что приводит к увеличению вязкости расплава и, следовательно, к нарушению исходных условий течения;

расплав припоя в процессе заполнения зазора изменяет температуру, что наблюдается при неодинаковом нагреве соединяемых деталей, в результате условия взаимодействия основного металла с припоем и течение последнего будут неравномерными. Аналогичное положение может иметь место вследствие неравномерного растворения основного металла припоем;

при течении припоев сложного состава в зазоре компоненты его избирательно взаимодействуют с поверхностью основного металла, что вызывает перемещение

частиц припоя в направлении, перпендикулярном к потоку. Отдельные компоненты основного металла также избирательно взаимодействуют с припоем;

в случае термического или концентрационного переохлаждения, а также взаимодействия с основным металлом происходит образование в расплаве и на границе с основным металлом отдельных кристаллов, что нарушает общую закономерность течения припоя в зазоре.

Кроме того, течение расплавленного припоя в зазоре зависит от характера предшествующей механической обработки, состояния поверхности основного металла, величины и равномерности зазора, способа удаления окисной пленки в процессе пайки и т. д. Так как влияние всех этих факторов теоретически трудно учесть, то на практике высоту h поднятия припоя в зазоре для каждого конкретного сочетания основной металл — припой определяют путем трудоемких экспериментов, результаты которых оформляют в виде графиков $h = f(a)$, где a — величина зазора. Это создает большие неудобства.

Первоначальная величина зазора в паяном соединении может быть определена из зависимости, устанавливающей связь зазора (рис. 18) с соответствующей ему высотой поднятия припоя [34]:

$$a_{\max} = \frac{a_0}{2} \left[1 - \cos \frac{57,3 (\pi r - b h^n)}{r} \right], \quad (35)$$

где $a_{\max}$ — максимально допустимый зазор, соответствующий высоте h поднятия припоя; a_0 — максимальный зазор между втулкой и стержнем; r — радиус стержня; b, n — постоянные (табл. 4).

4. Значения b и n для пайки стали Ст3 в среде водорода при отношении диаметра стержня к максимальному зазору, равном 20

Припой	Температура пайки, °C	b	n
Медь МБ	1130	7,36	0,27
Системы Fe — С — Mn	1140	5,07	0,37
На основе железа	1150	4,71	0,35
Латунь Л63	1000	7,13	0,29

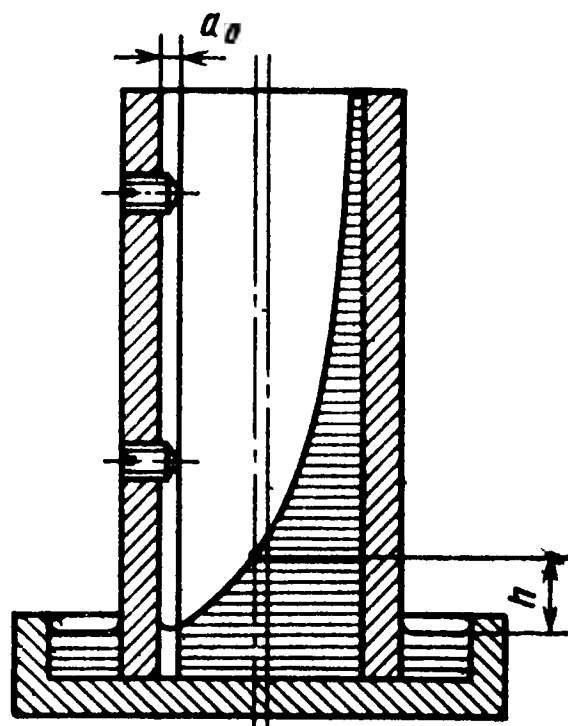


Рис. 18. Приспособление для определения высоты поднятия припоя в зазоре в зависимости от величины зазора

При оценке капиллярных свойств припоев следует иметь в виду, что прямой зависимости между высотой поднятия расплавленного припоя в зазоре и краевым углом смачивания им основного металла нет. Меньшему краевому углу смачивания не всегда соответствует большая высота поднятия припоя в зазоре. Так, краевой угол смачивания при введении в медно-серебряные припой индия уменьшается, однако высота подъема этих припоев в зазоре в случае пайки меди в вакууме не повышается, а снижается. Припой, имеющие больший краевой угол смачивания, обычно лучше текут при увеличенных зазорах (0,2—0,5 мм).

С изменением состава атмосферы, в которой производится пайка, меняется и высота подъема припоя. Для медно-серебряных припоев, легированных палладием, замена вакуума (10^{-5} мм рт. ст.) водородной средой при пайке меди увеличивает высоту подъема припоя как при малых, так и при увеличенных зазорах. Подобная же замена при применении припоя медь-золото практически не влияет на высоту подъема припоя. Как правило, водородная среда обеспечивает более благоприятные условия для течения припоев в зазоре, чем вакуум.

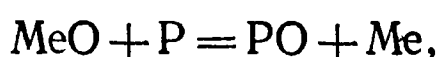
САМОФЛЮСОВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ СПАЯ

Для удаления окисных пленок с поверхности основного металла и припоя в процессе пайки применяют флюсы, активные газовые среды, вакуум. Однако в ряде случаев эти средства оказываются недостаточными, особенно при наличии на поверхности взаимодействующих металлов стойких пленок, содержащих окислы

хрома, титана, алюминия. Поэтому для улучшения условий смачивания и формирования спая в состав припоев вводят компоненты, продукты взаимодействия которых при пайке выполняют роль флюсов. В качестве таких компонентов применяют бор, фосфор, кремний, германий, барий и щелочные металлы: литий, калий, натрий. Для этих целей могут быть использованы также и другие щелочные и щелочноземельные металлы.

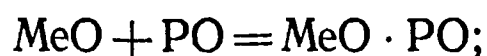
Процессы самофлюсования при пайке на основе современных представлений связаны:

1) с восстановительными свойствами основы припоя и легирующих компонентов в нем, они взаимодействуют с окислами основного металла по реакции



где MeO — окисел основного металла; P — раскислитель;

2) с флюсующей ролью окислов, образующихся при окислении раскислителя



так протекают процессы флюсования при пайке с применением окисных флюсов типа стекол, а также флюсов, содержащих окислы в качестве активного компонента [37];

3) с разрушением окисной пленки под действием расплава припоя в результате проявления механизмов: адсорбционного понижения прочности, диспергирования и последующего растворения окислов в расплаве.

При протекании реакций по первому и второму механизмам можно оценить возможность смачивания по изменению изобарных потенциалов. Изменение изобарного потенциала реакции по первому механизму

$$\Delta Z^0 = \Delta Z_{\text{MeO}}^0 + \Delta Z_{\text{P}}^0 - (\Delta Z_{\text{PO}}^0 + \Delta Z_{\text{Me}}^0).$$

При анализе различных систем найдено [31], что если ΔZ имеет большую положительную величину (порядка 80—100 ккал/г·атом O_2), то краевой угол мало отличается от 180° . Работа адгезии составляет $(1 \div 3) \cdot 10^{-5}$ дж/см² и близка по величине к Ван-дер-Ваальсовскому взаимодействию; смачивание отсутствует.

При отрицательных значениях ΔZ (порядка — 5 до —10 ккал/г·атом O_2) краевой угол уменьшается до $20\text{—}30^\circ$.

Такой подход позволяет определить возможность смачивания и последующего взаимодействия по первому и второму механизмам, но не позволяет оценить интенсивность удаления окисной пленки по третьему механизму, который протекает наиболее активно и вносит существенный вклад в процесс самофлюсования.

При пайке в условиях, не способствующих проявлению действия первого и второго механизмов или способствующих их малому проявлению (пайка несамофлюсующими припоями в нейтральных газовых средах и вакууме), ведущую роль играет адсорбционный эффект и диспергирование окисной пленки под действием расплава припоя. Определенный вклад в отслаивание окисной пленки вносят напряжения I и II рода, имеющиеся на границе основной металл — окисная пленка, а также напряжения, связанные с диффузией малорастворимых в окисной пленке атомов припоя. Упругие искажения на границе основной металл — окисная пленка и наличие дислокации несоответствия на этой границе также способствуют растворению основного металла в расплаве припоя и, таким образом, отслаиванию окисной пленки [8].

При пайке в восстановительной среде дополнительно к указанным механизмам накладывается восстановление окисной пленки. При пайке, например, армко-железа в водороде при температурах 1100, 1150 и 1200° С и выдержках 10, 30 и 60 с обнаружено, что с повышением температуры пайки и времени выдержки растворяющее действие припоя по отношению к окисной пленке основного металла усиливается. Даже в тех случаях, когда армко-железо перед пайкой специально окислялось, в водородной среде окисная пленка быстро удаляется даже при минимальной температуре пайки и выдержке в течение 10 с. В этой же среде на стали Ст3 растворение окисной пленки в припое происходит более медленно и легко прослеживается зависимость скорости ее удаления от температуры пайки и времени выдержки. Как

видно на рис. 19 (см. вкл.), окисная пленка, перешедшая в расплав припоя, приобрела мелкодисперсную зернистую структуру. Исследование зерен окисной пленки на микрорентгеновском анализаторе МАР-1 показало, что в их состав входит 89% железа и 6,6% меди, что свидетельствует о том, что отдельные зерна восстановились до металла и произошло насыщение их медью.

Влияние основного металла на процесс самофлюсования связано с природой и строением образующейся на нем окисной пленки, со способностью ее разрушаться под действием нагрева и образовывать легкоплавкие шлаки с окислами припоя.

Данные по растворимости кислорода в металлах, входящих в состав высокотемпературных припоев, приведены в табл. 5 [22]. Из таблицы видно, что кислород интенсивно растворяется расплавленной медью. При охлаждении расплава растворенный кислород переходит в окислы. При содержании 0,39% кислорода по массе образуется эвтектика медь-кислород с температурой плавления 1065° С.

5. Растворимость кислорода в металлах, входящих в состав припоев

Металл	Температура, °С		Температура растворения, °С	Растворимость кислорода, % (атомных)	Металл	Температура, °С		Температура растворения, °С	Растворимость кислорода, % (атомных)
	плав-ления	кипе-ния				плав-ления	кипе-ния		
Медь	1083	2570	1200	5,7	Железо	1537	3070	1537	0,6
Серебро	960,8	2200	1000	2,0	Палладий	1552	4000	1200	0,4
Никель	1455	2900	1200	0,044	Кремний	1420	3240	1420	0,004
Хром	1850	2620	1850	2,5	Олово	231,9	2750	1750	45,0
Кобальт	1492	2900	1700	1,15	Свинец	327,3	1740	600	0,035

Серебро, являющееся основой обширного класса серебряных припоев, по отношению к армко-железу и углеродистым сталям, так же как и медь, обладает самофлюсующими свойствами, но активность процесса самофлюсования им несколько ниже. Тем не менее в процессе пайки армко-железа и стали Ст3 серебром происходит удаление окисной пленки, отрыв ее от поверхности основного металла и сплавление в шве (рис. 20, см. вкл.). Превалирующим в этом случае является третий механизм удаления окисной пленки.

При пайке припоями, относящимися к самофлюсующим, т. е. содержащими в своем составе специальные добавки, интенсивность процесса удаления окисной пленки с основного металла, наряду с растворяющим действием основы припоя, зависит от физико-химических свойств флюсующих добавок. Такие самофлюсующие припои, как эвтектика медь-фосфор, припои марок ВПр4, ПСр 72ЛМН при одинаковых условиях пайки удаляют окисную пленку более активно, чем медь и серебро. Флюсующие добавки интенсифицируют процессы, протекающие по первому механизму. Однако они могут и непосредственно вступать во взаимодействие с основным металлом и изменять механизм процесса самофлюсования. Например, при пайке припоями медь-фосфор наряду с восстановлением окисной пленки протекает реакция образования интерметаллида Fe_3P . Наличие слоя интерметаллида на поверхности отслоившейся пленки и основного металла подтверждается замером микротвердости, которая для интерметаллидных прослоек составляет 852—1030 кгс/мм² при микротвердости основного металла 151—178 кгс/мм². При удалении окисной пленки механической обработкой и создании условий пайки, исключающих окисление (осушенная водородная среда), образование слоя интерметаллида происходит непосредственно на границе с зоной сплавления (рис. 21, см. вкл.). Слой, примыкающий к основному металлу, является диффузионным. Образование твердой и хрупкой интерметаллидной фазы не только по границе основной металл—зона сплавления, но и в шве за счет взаимодействия фосфора, содержащегося в припое с восстановленной окисной пленкой, является причиной низкой прочности соединений при пайке сталей меднофосфористыми припоями.

При пайке армко-железа и стали Ст3 самофлюсующим припоем марки ВПр4 (система медь — марганец — никель) активно протекает процесс взаимодействия окисной пленки с содержащимися в припое В, Р, Si, Li, К, Na по второму механизму. В результате окисная пленка удаляется с поверхности основного металла и образуется легкоплавкий шлак, который при металлографическом исследовании просматривается в шве в виде каплевидных включений (рис. 22, см. вкл.). Активных составляющих припоя оказалось недостаточно, чтобы связать в легкоплавкий шлак всю окисную пленку, поэтому на одной из соединяемых поверхностей видны остатки пленки, не связанные флюсующими компонентами в шлак.

При наличии восстановительной атмосферы перешедшая в расплав припоя окисная пленка, как показано выше, восстанавливается, в результате чего в шве можно наблюдать мельчайшие зерна железа. При этом с увеличением выдержки при температуре пайки в шве происходит коагуляция отдельных зерен железа, объединение их в более крупные образования (рис. 23, см. вкл.). Увеличение выдержки при пайке в нейтральных средах приводит к коагуляции пленки.

Самофлюсующие припои марок ВПр4, ПСр 72ЛМН, эвтектика медь-фосфор в нейтральных газовых средах и в вакууме резко снижают свою активность по сравнению с пайкой в среде водорода. Так, при пайке в среде водорода армко-железа

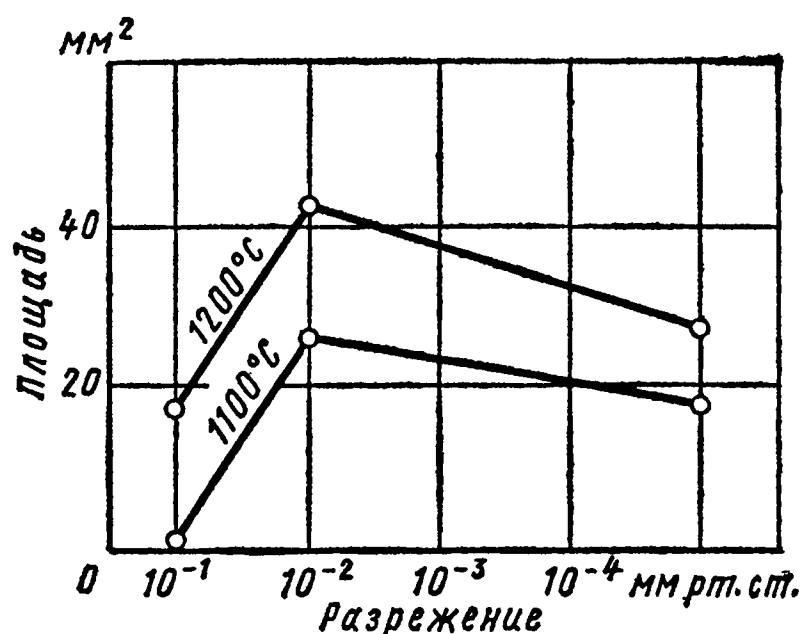


Рис. 24. Площадь растекания меди по окисленному армко-железу в зависимости от степени вакуумирования

и стали Ст3 самофлюсующим припоем ПСр 72ЛМН, содержащим в качестве флюсующего компонента 0,4—0,6% Li, окисная пленка переходит в расплав припоя, где равномерно распределяется в шве. При пайке же этим припоем в среде азота окисная пленка переходит в расплав припоя сравнительно крупными монолитами, процесс растворения ее протекает медленно, равномерного распределения окисной пленки в шве не достигается. Таким образом, резкое различие активности самофлюсования припоев с добавками и без них при пайке в нейтральных газовых средах сглаживается.

Газовые среды по-разному влияют на процесс растворения окисной пленки в расплаве припоя. При пайке армко-железа и стали Ст3 в азоте и в вакууме в первую очередь наблюдается отслоение окисной пленки и переход ее в расплав припоя

сравнительно крупными монолитами, затем уже происходит растворение в расплаве припоя. При пайке в среде азота ввиду отсутствия восстановления окислов перенос окисной пленки происходит в основном за счет растворения в припое, поэтому удаление протекает более медленно, в структуре шва можно видеть частицы окисной пленки как на поверхности основного металла, так и в зоне сплавления. С увеличением температуры и времени выдержки растворение усиливается.

При пайке в вакууме окисная пленка на поверхности основного металла также растворяется в расплавленном припое, но медленнее, чем при пайке в среде азота. Если при пайке стали Ст3 в азоте после минутной выдержки при температуре пайки окисная пленка в шве обнаруживается в виде следов, то в вакууме, хотя припой растворяет пленку и образует металлический контакт с основным металлом, она сохраняется у его поверхности в виде отдельного слоя или сплавляется. Удаление окисной пленки при пайке в вакууме резко зависит от степени вакуумирования. Так, предварительно окисленное на воздухе при 700° С в течение 1 мин армко-железо подвергалось пайке медью соответственно в вакууме 1·10⁻¹, 1·10⁻² и 1·10⁻⁵ мм рт. ст. при температуре 1100 и 1200° С с выдержкой 1 мин. При температуре 1100° С в вакууме 1·10⁻¹ мм рт. ст. навеска припоя формируется в каплю и остается в таком виде на окисленной поверхности армко-железа. В вакууме 1·10⁻² мм рт. ст. при той же температуре навеска припоя растекается. В вакууме 1·10⁻⁵ мм рт. ст. растекание также имеет место, но площадь растекания снижается (рис. 24). При металлографическом

исследовании спая установлено, что в случае пайки в вакууме $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. окисная пленка, имевшаяся на поверхности армко-железа, в зоне сплавления практически не просматривается, так как она разлагается и растворяется в расплаве припоя. В случае же пайки в вакууме $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. окисная пленка лишь отслаивается от поверхности армко-железа и ее в большом количестве можно наблюдать при исследовании микроструктуры швов. Следовательно, самофлюсование при пайке армко-железа медью в вакууме, как и растекание, наиболее интенсивно при степени вакуумирования $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. С повышением температуры пайки интенсивность самофлюсования повышается при любой степени вакуумирования, однако максимум, соответствующий разрежению $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., сохраняется. Причины этого явления см. на стр. 21.

Учитывая количество вводимых в припой флюсующих добавок и общее количество припоя, находящегося в капиллярном зазоре при пайке, можно сделать вывод, что процесс самофлюсования главным образом связан с адсорбционным понижением прочности, диспергированием окисной пленки и последующим растворением ее в расплаве припоя. Влияние флюсующих добавок и продуктов взаимодействия этих добавок на окисную пленку основного металла является вторичным. Это обстоятельство требует более серьезной постановки вопроса о чистоте применяемых припоев по окислам, поскольку только расплавы бескислородных металлов способны активно растворять в своем составе в значительном количестве окислы и, следовательно, образовывать при взаимодействии с основным металлом спай, обладающие высокой прочностью.

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОЙ ФАЗЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ СПАЯ

Исследования структуры жидких веществ рентгенографическими и нейтронографическими методами показали, что при плавлении происходит разрушение дальнего порядка кристалла. Ближний порядок сохраняется. Сохранение жидкостью ближнего порядка при температурах около точки плавления обусловлено электронным строением внешних оболочек ионов и взаимодействием их при образовании связей.

Изменение размещения атомов при переходе из жидкого состояния в твердое можно оценить на основе сравнения их внутренней энергии. При температуре кристаллизации изобарно-изотермический потенциал жидкой и твердой фаз одинаков и может быть определен из соотношения

$$Z = u - TS + pV, \quad (36)$$

где u — внутренняя энергия фазы; T — абсолютная температура; S — энтропия, являющаяся мерой неупорядоченности структуры фазы; p — давление; V — объем.

Поскольку энтальпия фазы

$$H = u + pV,$$

то предыдущее выражение можно записать в виде

$$Z = H - TS.$$

Тогда равенство изобарно-изотермических потенциалов жидкого и твердого металлов при температуре кристаллизации T_k будет иметь вид

$$H_{\text{ж}} - T_k S_{\text{ж}} = H_{\text{т}} - T_k S_{\text{т}}.$$

Учитывая, что $H_{\text{ж}} - H_{\text{т}} = L$, получим

$$\Delta S = S_{\text{ж}} - S_{\text{т}} = \frac{L}{T_k}, \quad (37)$$

где L — скрытая теплота плавления.

Из этой зависимости следует, что мера изменения степени порядка при кристаллизации жидкости может быть определена как отношение скрытой теплоты плавления к температуре кристаллизации.

При пайке процесс кристаллизации на подложку характерен: активным взаимодействием между расплавленным припоем и основным металлом;

ориентирующим влиянием на процесс кристаллизации подложки (основного металла);

зависимостью характера кристаллизации и прочности образующегося соединения от количества припоя в зазоре.

Процессы образования соединения при пайке протекают обычно в зазоре порядка 0,05—0,2 мм, поэтому количество жидкого металла, находящегося в нем, незначительно. Взаимодействие между твердым и расплавленным металлами приводит к значительному изменению состава жидкой фазы, особенно при высокотемпературной пайке припой интенсивно легируется компонентами основного металла. Легирование усиливается в связи с отсутствием на основном металле окисной пленки и наличием вследствие этого непосредственного металлического контакта с припоем. При пайке происходит интенсивное растворение основного металла в расплавленном припое. Растворение ослабевает, когда в припой вводят компоненты, входящие и в состав основного металла. Исходный состав припоя в процессе пайки может меняться не только за счет растворения в нем основного металла, но и в результате избирательной диффузии компонентов припоя в основной металл, испарения наиболее летучих компонентов припоя, окисления и удаления в шлак за счет газовой фазы или окислов основного металла.

Влияние паяемого металла на процесс образования спая сказывается и непосредственно при кристаллизации, которая происходит на готовых поверхностях раздела. При этом образование зародышей кристаллов на поверхности основного металла зависит от характера смачивания последнего припоем. Чем меньше краевой угол смачивания, тем меньше затрат энергии требуется для образования зародыша. Если краевой угол мал, то для зарождения зародыша кристалла требуется незначительное переохлаждение. Поскольку обязательным условием пайки является смачивание припоем основного металла, то условия зарождения центров кристаллизации при этом весьма благоприятны.

Влияние твердой поверхности основного металла приводит к тому, что кристаллизация с самого начала в той или иной степени ориентирована, т. е. имеет место определенное соотношение между формой и размерами кристаллической ячейки металла зоны сплавления и основного металла. При наличии ориентирующего влияния подложки структура металла зоны сплавления образуется в результате развития трех последовательных стадий процесса. На первой стадии ориентировка формирующихся кристаллов целиком определяется подложкой. Следующая стадия характеризуется появлением двойников и других структурных несовершенств в связи с уменьшением ориентирующего влияния основного металла. На третьей стадии наблюдается или поликристаллическая структура, или возникает текстура роста. В зависимости от соотношения параметров решетки кристаллов основного металла и кристаллов, образующихся из расплава, ориентированная кристаллизация может протекать по-разному. Выделяющаяся из расплава новая фаза отличается от основного металла видом атомов, типом и параметрами решетки. Образующиеся из нее кристаллы сопрягаются с подложкой такой кристаллографической плоскостью, в которой расположение атомов наиболее подобно расположению аналогичных атомов в грани кристалла основного металла. Вероятность такой кристаллизации будет тем больше, чем меньше различия межатомных расстояний в плоскостях сопрягающихся фаз. Так, при осаждении алюминия на монокристаллические пластинки платины [55], при ориентированной кристаллизации меди на никель [13] силы притяжения атомов основного металла вынуждают атомы осаждающегося металла занимать узлы не своей решетки, а решетки подложки. Следовательно, кристалл основного металла навязывает образующемуся кристаллу свой собственный период решетки. Деформация постепенно, с увеличением толщины слоя растущего кристалла, снижается. При определенной толщине слоя, контактирующего с подложкой, кристалл приобретает обычный для него параметр решетки. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что при пайке в зоне контакта основной металл — расплав при наличии ориентированной кристаллизации и различии между кристаллами подложки и образующимися из расплава существует промежуточный слой, в котором решетки как обра-

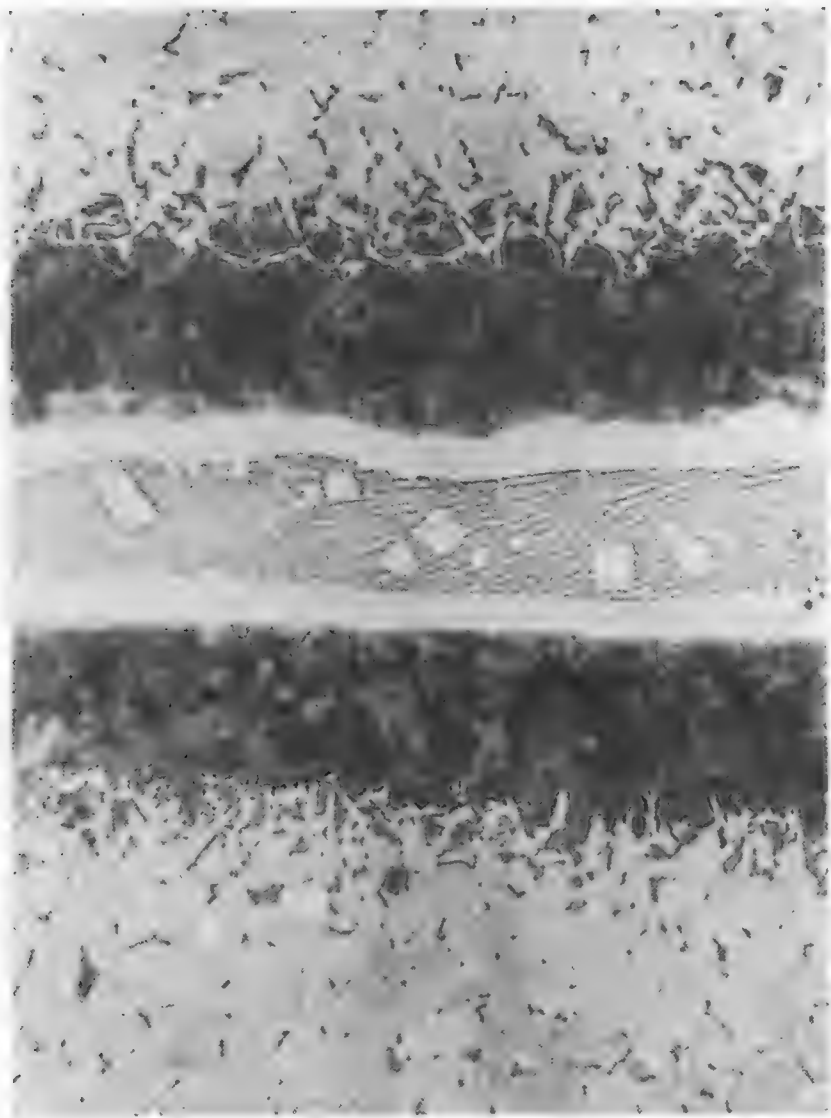


Рис. 1. Зоны паяного соединения

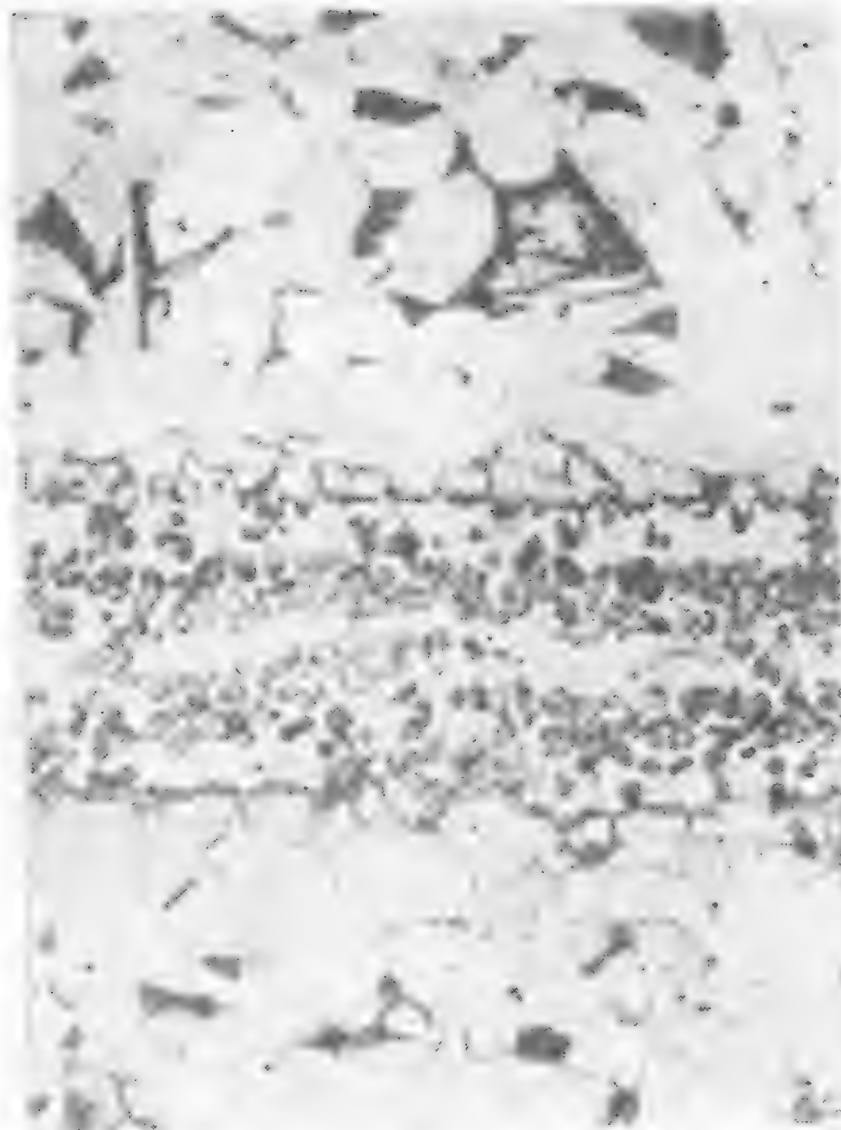


Рис. 19. Микроструктура шва при пайке стали Ст3 медью в водороде. Температура пайки 1120°C , выдержка 0,5 мин; $\times 200$

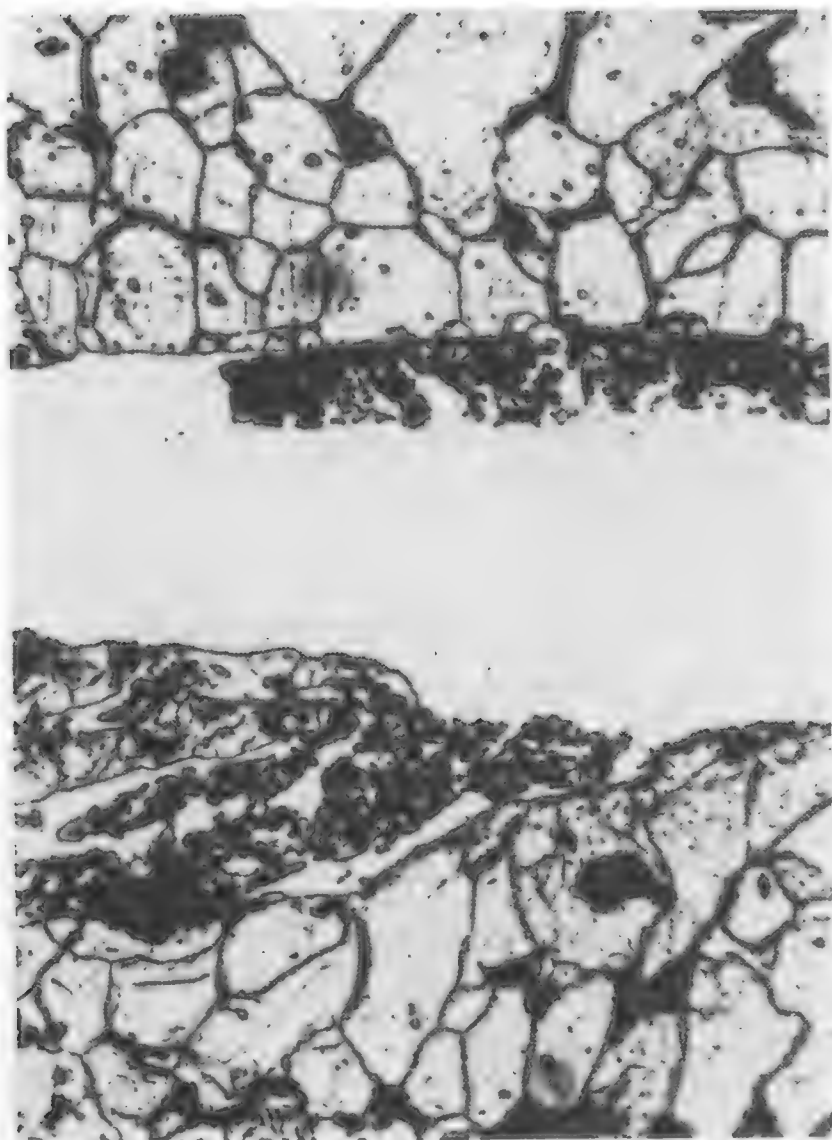


Рис. 20. Микроструктура шва при пайке стали Ст3 серебром в среде водорода. Температура пайки 1000°C , выдержка 0,5 мин; $\times 200$



Рис. 21. Микроструктура шва при пайке стали Ст3 эвтектикой медь-фосфор в среде водорода. Температура пайки 960°C , выдержка 0,5 мин; $\times 600$

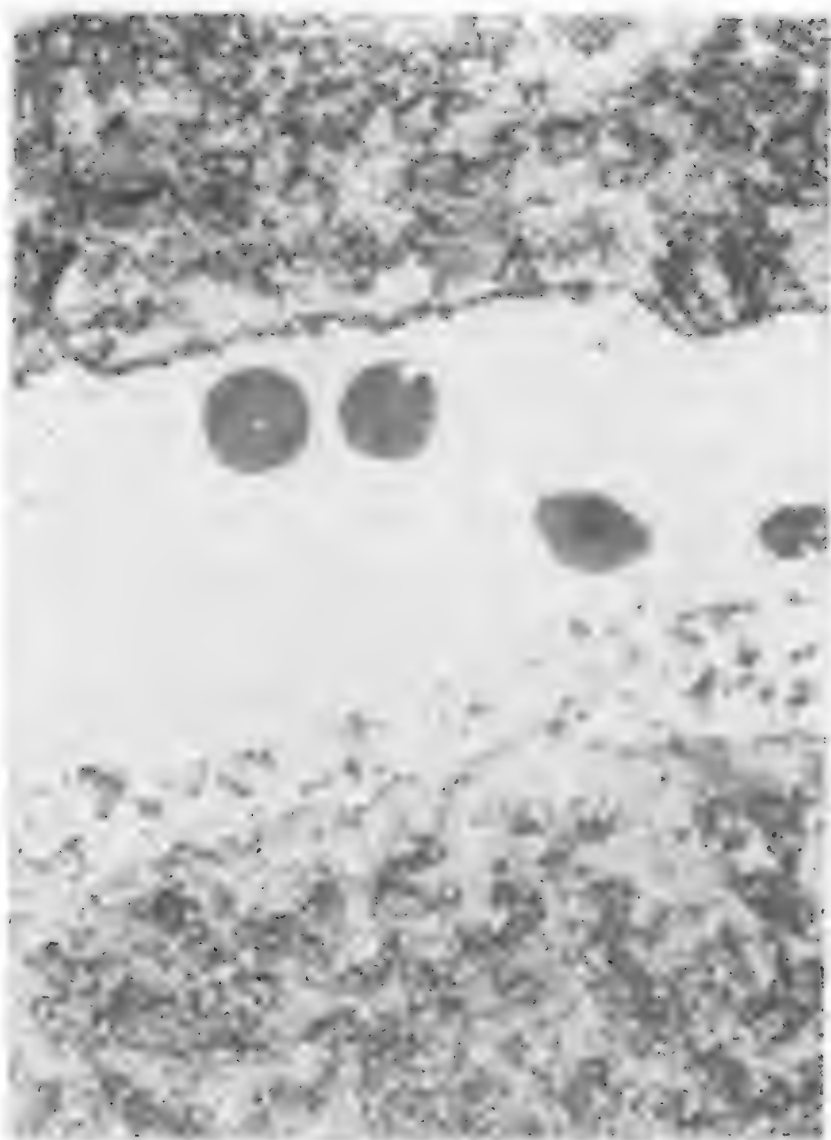


Рис. 22. Микроструктура шва при пайке стали Ст3 припоем ВПр4 в среде водорода. Температура пайки 1040°C , выдержка 5с; $\times 300$



Рис. 23. Микроструктура шва при пайке стали Ст3 медью в среде водорода. Температура пайки 1120°C , выдержка 5 мин; $\times 200$

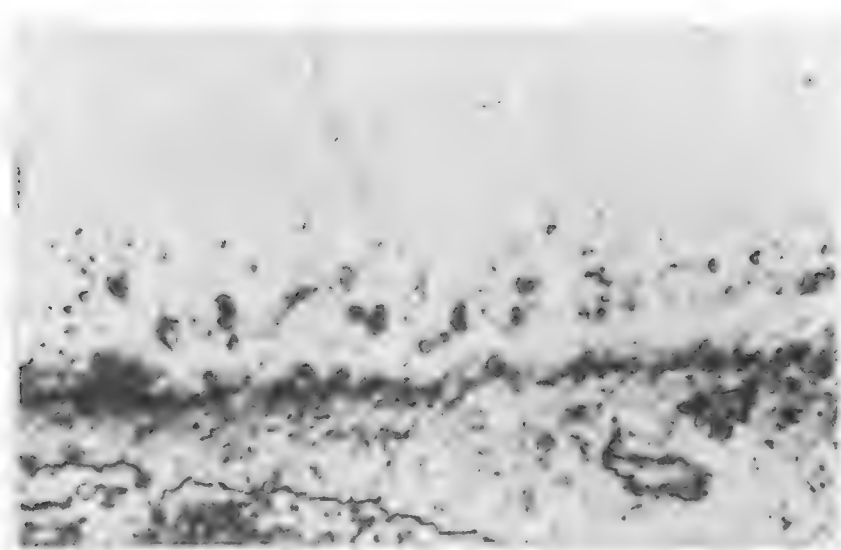


Рис. 25. Зона спая при пайке армко-железа золотом. Температура пайки 1100°C , выдержка 1 мин; $\times 800$

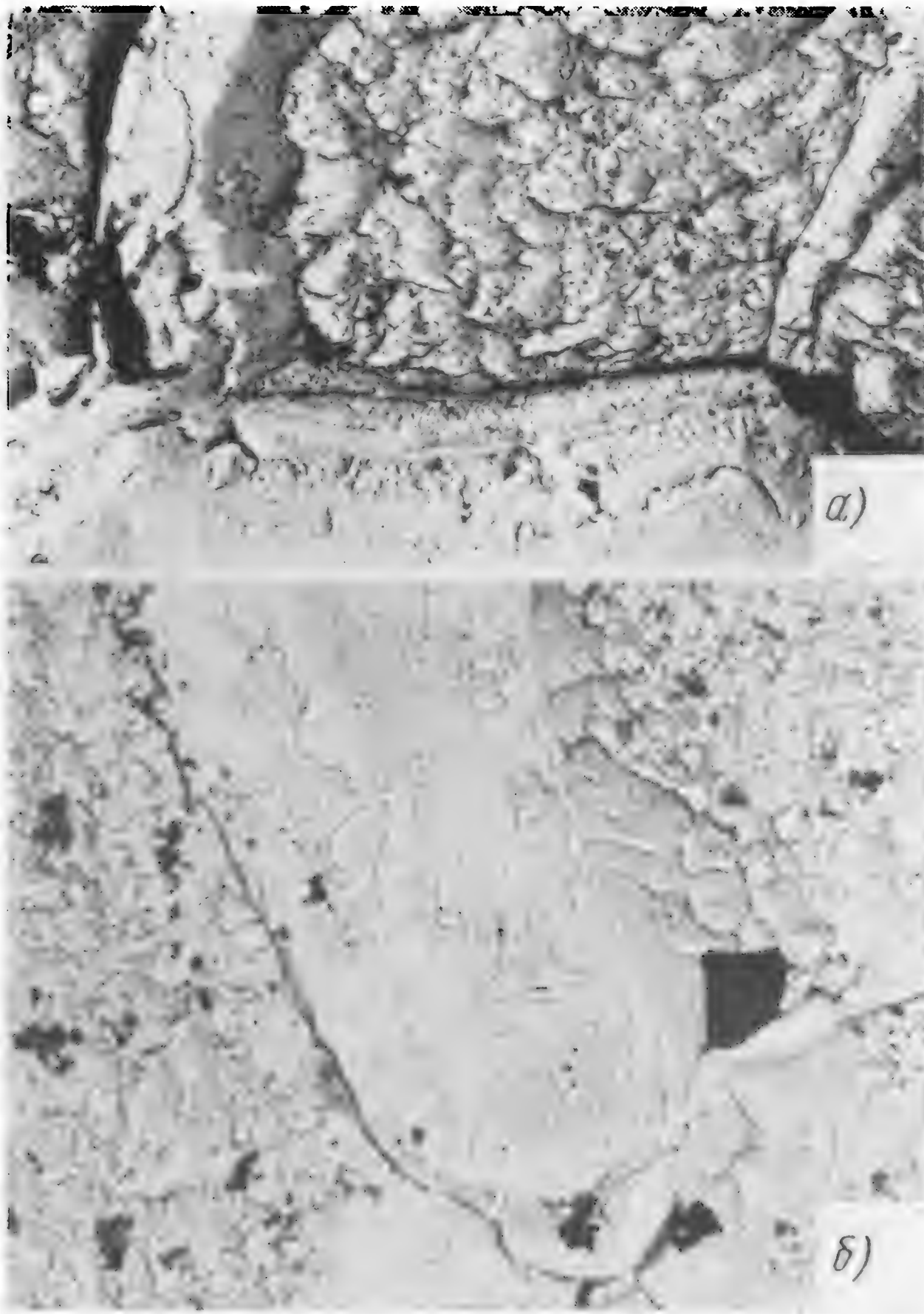


Рис. 27. Диффузионный клин по границе зерен армко-железа (а) и его головная часть (б) при пайке золотом (увеличение соответственно $\times 2200$ и $\times 7400$)

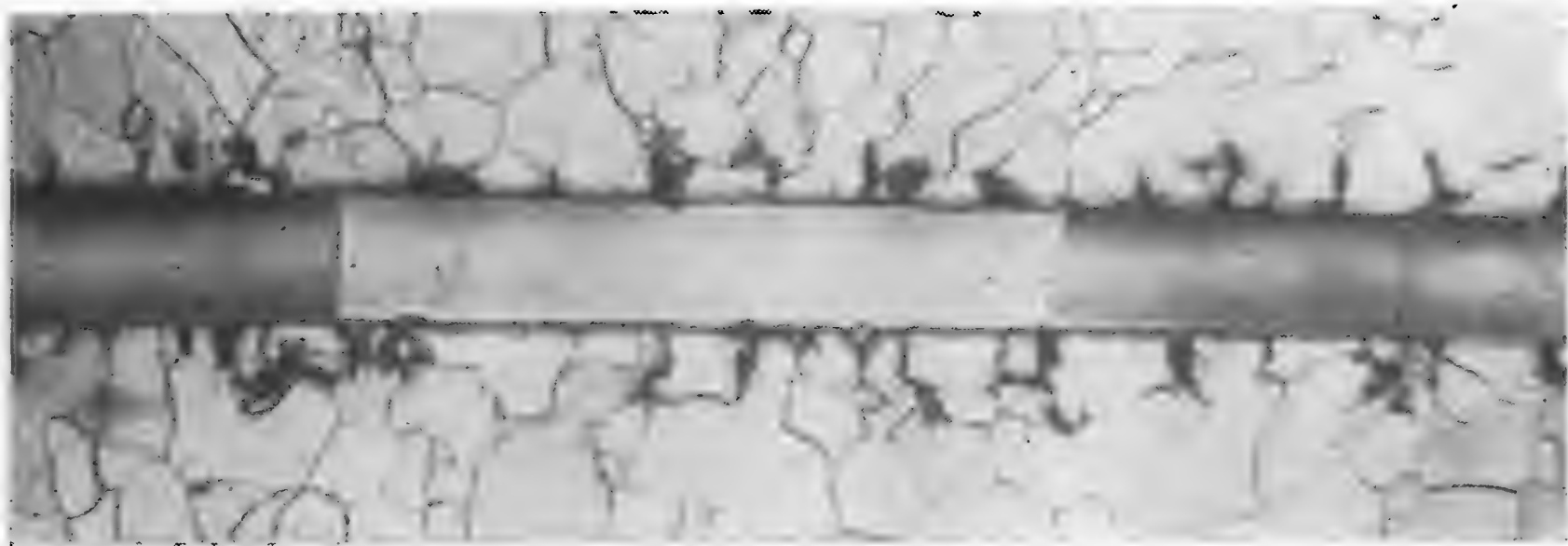


Рис. 28. Один ряд плоских зерен в шве при пайке армко-железа медью в среде водорода при температуре 11000°C , зазор $0,05\text{ м}$; $\times 200$



Рис. 31. Микроструктура шва при пайке армко-железа бериллием. Температура пайки 1350°C , выдержка 1 мин; $\times 125$



Рис. 32. Зона спая в галтельной части шва при пайке армко-железа бериллием; $\times 100$



Рис. 33. Микроструктура шва при пайке армко-железа бериллием. Температура пайки 1350°C , выдержка 1 мин; $\times 200$

зовавшегося кристалла, так и кристалла подложки находятся в напряженном состоянии.

При пайке железа медью, несмотря на то, что металлографическая картина ориентированной кристаллизации осложнена наличием полиморфного превращения в железе, рентгеновским методом установлено, что отдельные зерна железа находятся в определенном ориентационном соотношении с соответствующими зернами меди. Более четко эпитаксию меди можно наблюдать при пайке углеродистой стали. В этом случае границы бывших аустенитных зерен, обозначенные выделениями феррита в доэвтектоидной стали и сеткой цементита в заэвтектоидной, совпадают с границами зерен меди [53].

Таким образом, при формировании спая параметры решетки кристаллизующегося металла могут как уменьшаться, так и увеличиваться, приближаясь возможно точно к параметрам кристаллической решетки основного металла.

При наличии на поверхности паемого металла окисной пленки или слоя интерметаллического соединения ориентирующее действие основного металла даже при незначительной толщине указанных слоев практически не проявляется.

На процессы, протекающие на границе твердой и жидкой фаз, большое влияние оказывает диффузия. На рис. 25 (см. вкл.) показана микроструктура шва при пайке армко-железа золотом в среде водорода с точкой росы -50°C , из которой можно видеть, что золото интенсивно диффундирует в основной металл.

В данном случае имеет место повышенное проникновение припоя по границам зерен, обусловленное рядом факторов, связанных с диффузией малорастворимой примеси.

Диффузия малорастворимой примеси сопровождается образованием дислокаций, по которым в процессе канальной диффузии происходит активное проникновение жидкого металла.

Возникновение этих дислокаций обусловлено упругими напряжениями, которые релаксируются в процессе диффузии. Величина этих напряжений

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} \left[C - \frac{1}{a} \int_0^a C dy \right], \quad (38)$$

где β — относительное изменение параметра решетки основного металла при растворении 1% (атомного) припоя; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; C — концентрация элемента по толщине пластины основного металла; a — толщина пластины основного металла; y — текущая координата (перпендикулярно плоскости спая).

Из уравнения следует, что максимальные напряжения создаются в начале диффузионного процесса на поверхности пластины:

$$\sigma_{\max} = \frac{\beta C_s E}{1-\nu}, \quad (39)$$

где C_s — концентрация элемента на границе фаз.

Расчеты и эксперименты показывают, что у поверхности образца плотность дислокаций примерно в 10 раз больше, чем в объеме, и убывает с увеличением расстояния от поверхности. Глубина дислоцированного слоя, например для системы железо — индий, превышает глубину диффузионного слоя в 6 раз. Образовавшиеся в процессе диффузии дислокации и малоугловые границы, являясь путями коротких циркуляций, ускоряют иррегулярную диффузию примеси в объеме зерен. Этим и объясняется повышенное диффузионное проникновение по границам зерен. В приведенном случае пайки армко-железа золотом последнее, диффундируя по большеугловым границам и в объеме зерен основного металла, инициирует создание дислокационной сетки, имеющей наибольшее развитие по границам зерен. Повышенная проницаемость границ зерен обусловлена, с одной стороны, повышенной диффузионной подвижностью самой границы зерен, с другой — возникновением вокруг границ зерна области с повышенной диффузионной проницаемостью, которая может рассматриваться как диффузионная граница с существенно большей эффективной шириной.

Процесс, приводящий к образованию по границам зерен своеобразных диффузионных клиньев, показан на рис. 26. Структура этих клиньев, выявленная с применением оптического и электронного микроскопов, дана на рис. 27 (см. вкл.). Расширение клина происходит в результате диффузии золота в зерне и плавления образующегося при этом твердого раствора (рис. 27, а).

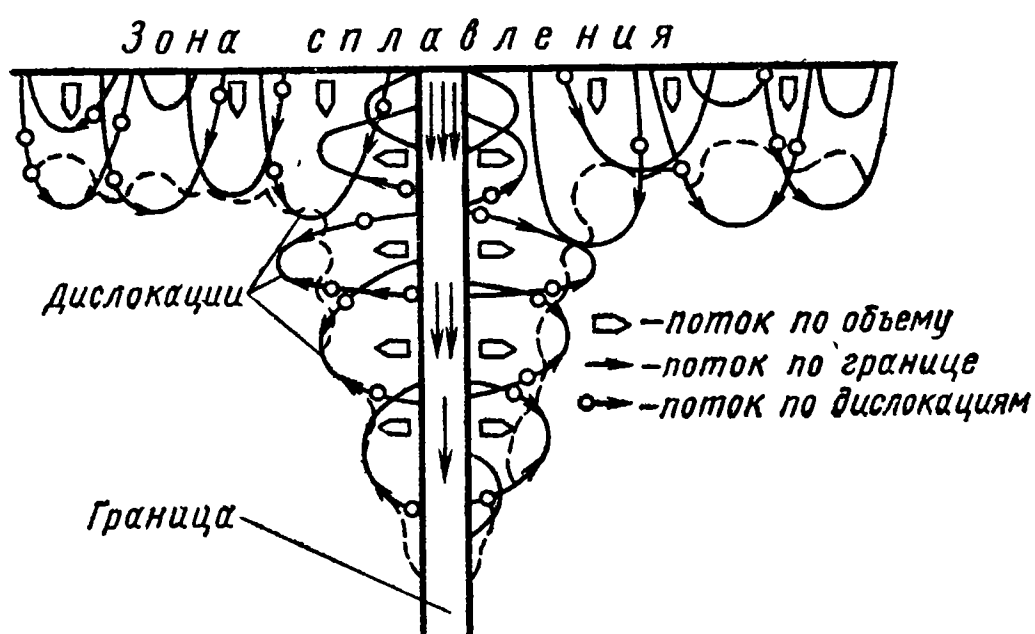


Рис. 26. Схема диффузионных потоков в зоне спая

что на процесс образования спая и соответственно на его прочность решающее влияние оказывает чистота поверхности основного металла. На рис. 27 видно, что спая по границе основной металл — шов фактически нет. Это связано не только с недостаточным флюсованием основного металла, но и с вытеснением неметаллических включений из расплава зоны сплавления при кристаллизации.

Исследование влияния количества жидкой фазы в шве на формирование спая на примере пайки низкоуглеродистой электротехнической стали марки НЖ по МРТУ 14—2—31—65 (армко-железо) показало, что в среде водорода в больших зазорах порядка 0,5—2 мм кристаллизация в шве происходит с образованием развитой дендритной структуры. При зазорах 0,4—0,3 мм затвердевание идет путем образования и роста крупных

6. Среднее содержание железа в зоне сплавления в случае пайки его медью при температуре 1100 °С в среде водорода

Величина зазора, мм	Время выдержки при температуре пайки, мин	Среднее содержание железа в зоне сплавления, % (по массе)
0,06	1	3,9
0,14		3,0
0,14	60	2,9
0,29	1	3,1
0,70		2,7
2,0		2,4

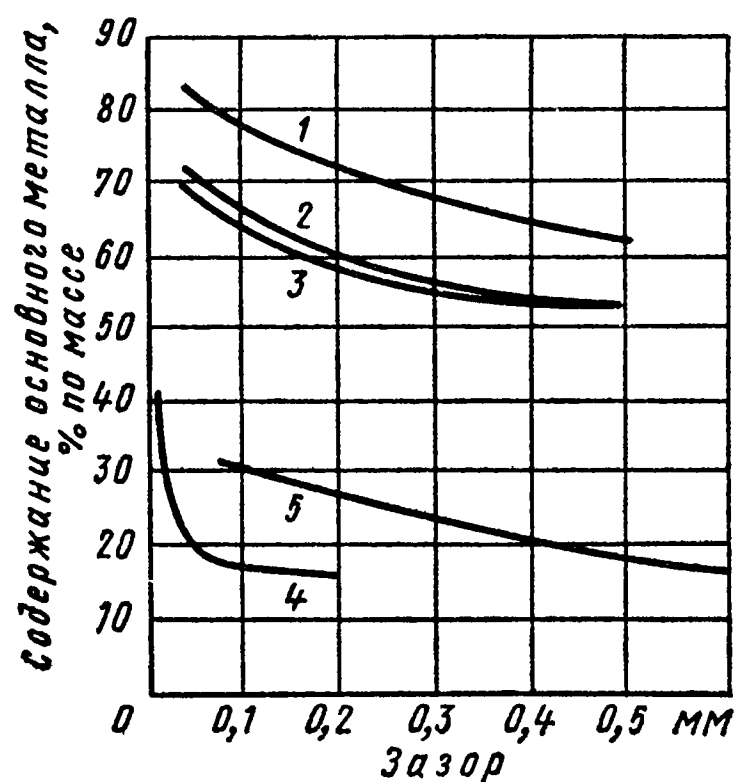


Рис. 29. Изменение содержания основного металла в шве в зависимости от величины зазора: 1, 2, 3 — изменение содержания меди в шве при пайке меди припоем ПСр 70 (температура пайки 875° С) по данным:

1 — МАР; 2 — GEOL; 3 — количественной металлографии; 4 — изменение содержания цинка в шве при пайке цинка припоем ПОСК-51 (температура пайки 200° С); 5 — изменение содержания алюминия в шве в зависимости от величины зазора при пайке алюминия цинком (температура пайки 480° С)

ячеистых кристаллов на границе с железом и разветвленных кристаллов в центральной части шва. С уменьшением зазора преобладающей становится ячеистая форма затвердевания. При зазоре 0,05 мм кристаллизация происходит путем образования по ширине шва одного ряда плоских зерен (рис. 28, см. вкл.). Зона сплавления в случае

пайки армко-железа медью при температуре 1100°C представляет однофазный твердый раствор железа в меди. Результаты определения среднего состава зон сплавления на установке МАР-1 в зависимости от величины зазора и времени выдержки приведены в табл. 6.

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что при применяемых зазорах и выдержках средний состав зон сплавления даже без учета прикристаллизованных слоев непостоянен. Содержание растворенного в зоне сплавления основного металла возрастает с уменьшением зазора.

Изменения химического состава шва в зависимости от величины зазора при пайке никеля медью, меди припоем ПСр 70, алюминия цинком, цинка припоем ПОСК-51 приведены на рис. 29. Как видно из кривых, во всех случаях с уменьшением зазора содержание основного металла в шве увеличивается. Если предположить, что перенос основного металла в расплав припоя при растворении происходит исключительно за счет атомарной диффузии, подчиняющейся уравнению Фика, то можно оценить время, необходимое для насыщения, например, меди железом при пайке. Согласно уравнению Фика,

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}. \quad (40)$$

Начальные и граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} C(x, 0) &= 0, & 0 < x < a; \\ C(x, t) &= C_0, & x = a, \end{aligned}$$

где a — зазор под пайку; t — время; C_0 — растворимость железа в меди при данной температуре.

Решение уравнения примем в виде

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \frac{(2n+1)\pi}{a} x \exp - \left\{ (2n+1) \frac{\pi}{a} \right\}^2 Dt \right], \quad (41)$$

где D — коэффициент диффузии железа в меди, принимаемый постоянным.

Вследствие ликвации при кристаллизации экспериментально можно определить лишь средний состав зоны сплавления.

Временная зависимость средней концентрации железа в меди определится из предыдущего уравнения:

$$C(t) = \frac{1}{a} \int_0^a C(x, t) dx = C_0 - \frac{8C_0}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \left\{ \frac{(2n+1)\pi}{a} \right\}^2 Dt \right]. \quad (42)$$

Для системы медь — железо коэффициент диффузии железа в меди при 1100°C составляет $8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$. Зависимость коэффициента диффузии железа от его концентрации не учитывается, поэтому результат расчета будет приближенным. При зазоре $a = 10^{-2} \text{ см}$ необходимое время для насыщения меди железом до $0,9 C_0$ составит

$$t = \frac{2,3a^2}{\pi^2 D} \approx \frac{2,3 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 8 \cdot 10^{-5}} \approx 0,3 \text{ с}.$$

Поскольку минимальное время выдержки при температуре пайки принято 1 мин (см. табл. 6), временной зависимости состава жидкой фазы в зазоре 0,1 мм наблюдаться не должно, что и подтверждается экспериментами.

Расчет не учитывает конвекционного переноса в расплаве и капиллярного давления, в силу чего дает завышенное время насыщения меди железом. В действительности растворение должно происходить с гораздо большей скоростью.

При увеличении температуры пайки независимо от времени выдержки структура швов остается однофазной: твердый раствор железа в меди. Отсутствие временной зависимости дает основание предположить, что составы жидких фаз в шве

при температурах пайки соответствуют равновесным, т. е. ликвидусу диаграммы состояния железо — медь, как и в случае пайки при 1100°C . После кристаллизации такие сплавы должны иметь двухфазную структуру, состоящую из твердых растворов на основе меди и на основе железа. Отсутствие в структуре зон сплавления второй из указанных фаз обусловлено ее выделением на поверхности основного металла в виде прикристаллизованных слоев, что и подтверждается микрорентгено-спектральным анализом образцов, паянных при температуре 1350°C (рис. 30). На кривой распределения отчетливо видна остановка, соответствующая слою твердого раствора на основе железа (11% меди).

В соответствии с диаграммой состояния уменьшение растворимости железа в жидкой меди при охлаждении приводит к выделению фазы, богатой железом. Последняя в условиях образования растворно-диффузионного спая выделяется в виде эпитаксиального слоя на границе с основным металлом.

При пайке железа медью с разными зазорами структура, формирующаяся при затвердевании расплава, оказывается при прочих равных условиях различной в малых и больших зазорах. В широких зазорах (0,5—2 мм) кристаллизация про-

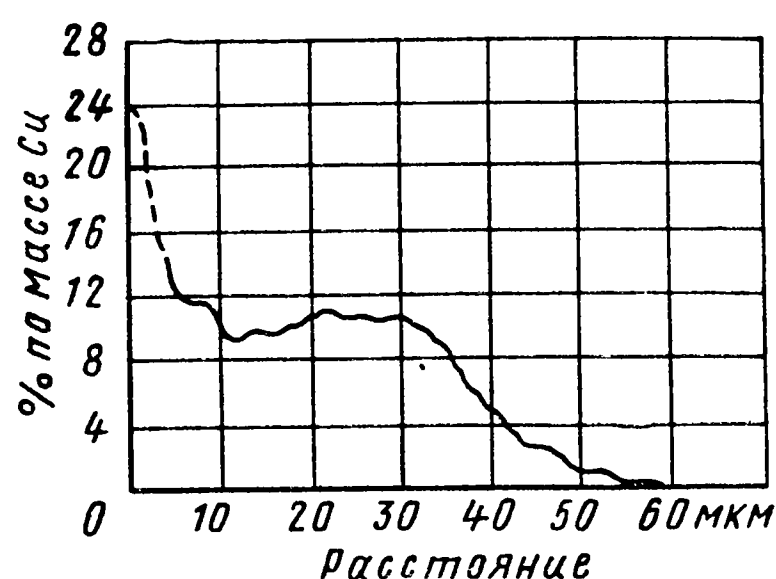


Рис. 30. Распределение меди в зоне спая при пайке армко-железа

исходит с образованием развитой дендритной структуры и имеет характер объемного затвердевания. Содержание железа в осях дендритов достигает 4%, а на периферии падает до 2—2,5% (по массе). Смена форм затвердевания с изменением величины зазора вызывается изменением условий кристаллизации. Согласно существующим представлениям, тип кристаллизации сплавов определяется градиентом температуры расплава, а также величиной и протяженностью области концентрационного переохлаждения вблизи фронта кристаллизации. При прочих равных условиях уменьшение зазора, а следовательно, слоя кристаллизующейся жидкости, начиная с определенного момента, приводит к таким изменениям указанных факторов, что

дендритная форма кристаллов постепенно уступает место ячеистой, а последняя — преобладающему росту кристаллов с гладкой поверхностью. Окончательная кристаллическая структура металла зоны сплавления не соответствует первоначальным формам роста кристаллов. Новые границы зерен в шве пересекают в произвольных направлениях дендритные и ячеистые кристаллы. При больших зазорах имеются участки, где «вторичные» границы совпадают с пограничными зонами первичных дендритов. При малых зазорах структура шва по ширине представляет собой один слой зерен. Возникновение вторичной структуры в литых сплавах связывается с образованием при кристаллизации большого количества дефектов (дислокаций и вакансий), способных перемещаться и группироваться в определенных участках затвердевающего металла.

Уменьшение зазора и, следовательно, количества затвердевающего металла в конечном счете приводит к образованию плоских границ зерен при пайке как однокомпонентными, так и многокомпонентными припоями.

С уменьшением зазора под пайку от 2 до 0,3 мм предел прочности стыковых соединений при пайке железа медью возрастает с 26 кгс/мм², что выше прочности припоя в исходном состоянии, до значения, равного прочности железа (34,5 кгс/мм²). При зазоре 0,3 мм медная прослойка оказывается равнопрочной с основным металлом. Дальнейшее уменьшение величины зазора приводит к тому, что зона сплавления оказывается прочнее основного металла. При механических испытаниях разрушение образцов происходит по основному металлу и прочность стыковых соединений, выполненных с зазором 0,15 мм и менее, перестает зависеть от толщины медной прослойки.

Поскольку состав зоны сплавления зависит от величины зазора под пайку и с уменьшением зазора содержание основного металла в зоне сплавления возрастает, то наблюдаемая зависимость прочности паяного соединения от величины зазора

может быть объяснена различной прочностью образующегося в шве сплава, изменением структуры шва с уменьшением зазора и «контактным упрочнением».

Начиная с определенной величины зазора, кристаллизация металла зоны сплавления идет с образованием по ширине шва одного ряда плоских зерен. В этих случаях кристаллизация происходит без разделения компонентов и твердый раствор в шве имеет более высокое содержание железа по сравнению с равновесным.

При механических испытаниях пластическая деформация развивается первоначально в шве — прослойке на медной основе, имеющей более низкое значение предела текучести, чем у основного металла. Однако в зонах спаев поперечный сдвиг медной прослойки сдерживается, поскольку основной металл еще не деформируется. В результате в медной прослойке возникает напряженное состояние объемного растяжения. Максимальные касательные напряжения, под действием которых происходит пластическая деформация и разрушение материала путем сдвига, в условиях трехосного растяжения металла прослойки будут меньше, чем при одноосном растяжении, что и является причиной относительного упрочнения шва. Эффективность контактного упрочнения возрастает с уменьшением отношения толщины медной прослойки к ее диаметру. В результате нормальные напряжения в прослойке могут значительно превысить предел прочности ее материала, определенный при свободной деформации. Количественная сторона явления контактного упрочнения развита в работах Бакши О. А. [7]. Для вязкого разрушения соединения по мягкой прослойке получена зависимость прочности соединения от механических свойств материала прослойки и ее размеров

$$\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{в}}^m \left\{ 1 + [3 \sqrt{3} \kappa (1 + \epsilon_{\text{в}})^{3/2}]^{-1} \right\}, \quad (43)$$

где $\sigma_{\text{в}}^m$ и $\epsilon_{\text{в}}$ — соответственно предел прочности и относительное удлинение материала прослойки в исходном состоянии; κ — отношение толщины прослойки к ее диаметру.

НЕПРЕРЫВНАЯ СТРУКТУРНАЯ СВЯЗЬ В ШВЕ

При образовании спаев взаимодействие на границе основной металл — расплавленный припой может приводить при затвердевании расплава к возникновению общих зерен. Такой тип кристаллизации связан с происходящим при пайке сплавлением зерен основного металла в результате снижения температуры плавления в ходе диффузионного насыщения его компонентами припоя. Такой вид спая наиболее характерен для пайки железа бериллием (рис. 31—33, см. вкл.).

Железо с бериллием образуют ограниченные твердые растворы и интерметаллические соединения. Эвтектики железо — бериллий имеют температуры плавления 1165° С при 8,3% бериллия и 1225° С при 75,4% бериллия. Максимальная растворимость бериллия в феррите при эвтектической температуре составляет 6,5% по массе. Бериллию присуще образовывать при кристаллизации крупные столбчатые кристаллы.

Процесс пайки армко-железа бериллием успешно протекает в вакууме $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. при нагреве до температур 1300—1350° С.

В среде водорода и азота бериллий по поверхности армко-железа не растекается и в зазор не течет, несмотря на применение газовых атмосфер с высокой степенью осушки (—60° С) и очистки (содержание кислорода ниже 0,0002% по объему).

Микроструктура соединения характерна образованием по границе спая общих зерен и крупных зерен сплава бериллий-железо в шве. Зерна основного металла и зерна, образующиеся в зоне сплавления, растут от поверхности твердого паяемого металла. Первоначальные границы основной металл — расплав припоя прослеживаются иногда в виде полос точечных скоплений примесей. Происхождение их связано с неполным разрушением окисной пленки в процессе взаимодействия на границе железо — бериллий или с сегрегацией примесей на этой границе. Часто отдельные зерна прорастают поверхность спая, и таким образом возникает сплошной монокристалл. При малых зазорах (менее 0,1 мм) наступает полное сращивание, линию спая в этом случае установить не удастся. В галтельной части шва, там, где избыточное количество бериллия, общие зерна в зоне спая при малых выдержках не появляются. В контакте с основным металлом образуется обычная при кристаллизации на под-

ложку зона спая. Общие зерна в этом случае не формируются в связи с тем, что поверхностный слой основного металла (зерна железа) интенсивно растворяется в избытке бериллия. Дальнейшее взаимодействие расплава зоны сплавления с основным металлом протекает менее активно, насыщения зерен железа до их сплавления не достигается.

При кристаллизации рост зерен часто отчетливо ориентирован. Зерна преимущественно растут в направлении, перпендикулярном к поверхности основного металла, что главным образом связано с направлением теплоотвода. Иногда ориентированность зерен возникает и на поверхности основного металла, смоченного бериллием. Зерна железа на границе с зоной сплавления ориентированы в этом случае под углом приблизительно $45\text{--}60^\circ$ к поверхности основного металла. Это

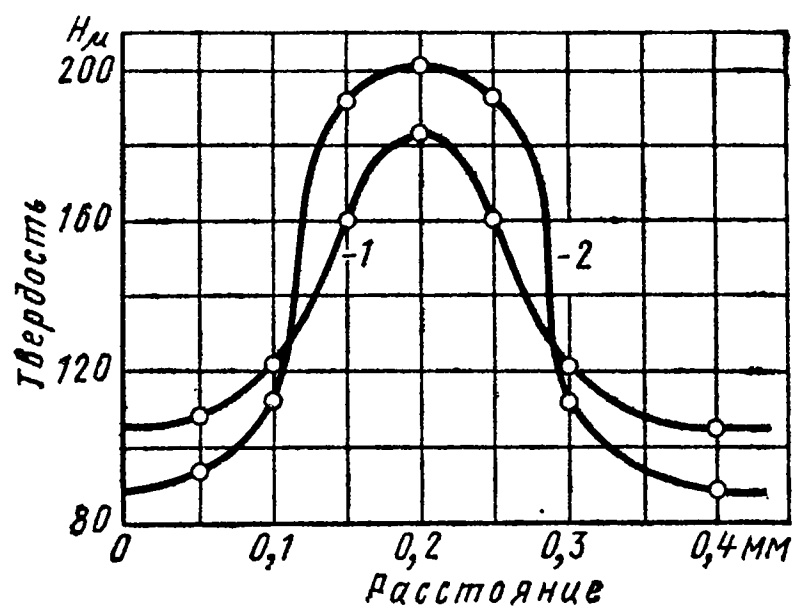


Рис. 34. Распределение микротвердости по ширине шва при пайке армко-железа бериллием:

1 — выдержка при пайке 1 мин; 2 — выдержка после пайки при 1250°C 1 ч

наиболее характерно проявляется в галтельной части шва, где имеется избыток бериллия по сравнению с капиллярной частью шва. Вдали от границы швов — основной металл зерна имеют относительно равноосную форму. С увеличением времени выдержки при пайке ориентированность зерен в направлении, перпендикулярном к поверхности основного металла, исчезает. Одновременно процесс взаимодействия между железом и бериллием усиливается, увеличивается размер зерен, они становятся более равноосны. Происходит сращивание отдельных зерен, в результате чего зона спая оказывается не по границам зерен, а в объеме отдельных зерен.

Замер микротвердости показал, что если с увеличением выдержки при температуре пайки твердость основного металла снижается, то твердость зоны сплавления

возрастает, причем наибольшая твердость наблюдается в центральной части зоны сплавления (рис. 34). Последнее связано с образованием интерметаллидов в зоне шва, более богатых бериллием.

Согласно исследованиям поверхностных слоев армко-железа и сталей, насыщаемых при температурах $1000\text{--}1150^\circ\text{C}$ бериллием, установлено, что диффузия бериллия в стали начинает заметно идти при 800°C , при 1150°C происходит сплавление зерен основного металла [48]. На границе низкоуглеродистая сталь — бериллий при 1000°C одновременно идут два процесса:

диффузия бериллия в сталь, что вызывает γ — α -перекристаллизацию и появление кристаллов α -фазы, ориентированных в направлении диффузии;

диффузия углерода из стали в бериллий, что вызывает обеднение поверхностных слоев стали углеродом.

Взаимодействие бериллия с углеродом приводит к образованию карбида бериллия, имеющего высокую твердость.

При охлаждении насыщенных бериллием образцов происходит выпадение из пересыщенного раствора бериллия в α -железе интерметаллических соединений — бериллидов, что сопровождается повышением твердости.

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ И СОСТАВА ПРИПОЯ НА СВОЙСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Изменение свойств основного металла происходит не только под влиянием нагрева и взаимодействия с расплавом припоя, но и под действием газовой среды, находящейся в камере пайки. Влияние газовых сред особенно заметно проявляется, когда основной металл активно взаимодействует с газовыми средами. Из конструктивных материалов, применяемых в паяных изделиях, таким свойством обладают титан и сплавы на его основе.

Взаимодействие титана с кислородом в атмосферных условиях протекает при комнатной температуре [9]. По мере повышения температуры интенсивность окисления возрастает. При достижении температуры 450° С параллельно идет проникновение кислорода в кристаллическую решетку титана и образование газонасыщенного (альфированного) слоя, представляющего собой твердый раствор газа в металле. При температуре выше 600° С кислород активно диффундирует в титан [14].

Наличие газов в кристаллической решетке титана приводит к ее искажению, являющемуся причиной уменьшения пластических свойств материала.

В многочисленных исследованиях, посвященных изучению взаимодействия титана с газами, было установлено, что высокотемпературный нагрев титана на воздухе, а также в среде кислорода приводит к появлению на его поверхности окалины, состоящей главным образом из рутила [29, 45].

При окислении титана в парах воды при температуре 800—1200° С окисная пленка состоит только из фазы TiO₂ в модификации рутила; фаз Ti₂O₃ и TiO не обнаруживается. Таким образом, основная роль при образовании поверхностных пленок на титане отводится кислороду и водяному пару.

Из других атмосферных газов в образовании поверхностных пленок при высоких температурах большое значение имеет азот. При окислении титана на воздухе азот в составе окалины обнаруживается, начиная с температуры 900° С. Отмечается, что наличие азота в решетке рутила приводит к образованию дырчатой структуры, облегчающей диффузию кислорода в объеме окисной пленки [5]. Толщины окисных пленок, образующихся при окислении титана BT-1 на воздухе, приведены в табл. 7.

7. Толщины окисных пленок, мм, при окислении на воздухе

Температура, °С	Продолжительность испытаний, ч						
	0,5	1	2	4	8	16	32
800	—	—	—	—	0,005	0,017	0,029
900	0,012	0,02	0,03	0,05	0,075	0,10	0,25
1000	0,035	0,06	0,10	0,19	0,25	0,30	—

Пайку титановых сплавов производят при температуре около 1000° С, поэтому при наличии окислительной атмосферы взаимодействие кислорода с титаном в процессе пайки протекает с большой интенсивностью.

Удаление окисных пленок при пайке титана фактически обеспечивается путем регулирования соотношения скоростей окисления и растворения окислов в основном металле и в конечном итоге достигается за счет применения среды с парциальным давлением кислорода, при котором скорость растворения пленки больше, чем скорость ее роста.

Применение аргона или вакуума при пайке титана не изменяет механические свойства соединений, выполненных припоями на основе серебра, а также припоями систем титан—никель, титан—никель—медь, титан—никель—медь—кобальт и др. [51]. Однако в отдельных случаях применение вакуума показывает лучшие результаты по сравнению с аргоном. Например, при пайке титана припоем на основе алюминия в вакууме с остаточным давлением 1·10⁻³ мм рт. ст. растекание лучше, чем в атмосфере аргона [48]. При пайке титана с повышенным содержанием водорода в вакууме достигается не только улучшение условий пайки, но и обезводороживание основного металла. В связи с этим утвердилось мнение о предпочтительности вакуума перед нейтральными газами даже в тех случаях, когда не удастся создать высокой степени разрежения, как это имеет место, например, при пайке крупногабаритных изделий в печах с использованием механических вакуумных насосов, в то время как применение низкого вакуума с повышенным содержанием примесей приводит к уменьшению пластичности основного металла, что становится особенно опасным при пайке тонколистовых конструкций. В этом случае использование вместо вакуума аргона может снизить содержание примесей. Поэтому, если необходимо максимальное сохранение пластичности основного металла, то, несмотря на удовлетворительное

протекание процесса пайки в вакууме, вопрос предпочтительности вакуума или аргона следует решать с учетом содержащихся в них вредных примесей.

При сравнении содержания кислорода в вакууме и аргоне имеем [38]

$$p_{O_2}^v = C_0 p_v;$$

$$p_{O_2}^{Ar} = C p_{Ar},$$

где $p_{O_2}^v$ и $p_{O_2}^{Ar}$ — парциальное давление кислорода соответственно в вакууме и аргоне; C_0 и C — соответственно концентрация кислорода в воздухе и аргоне при нормальных условиях; p_v и p_{Ar} — остаточное давление вакуума и давление аргона при пайке.

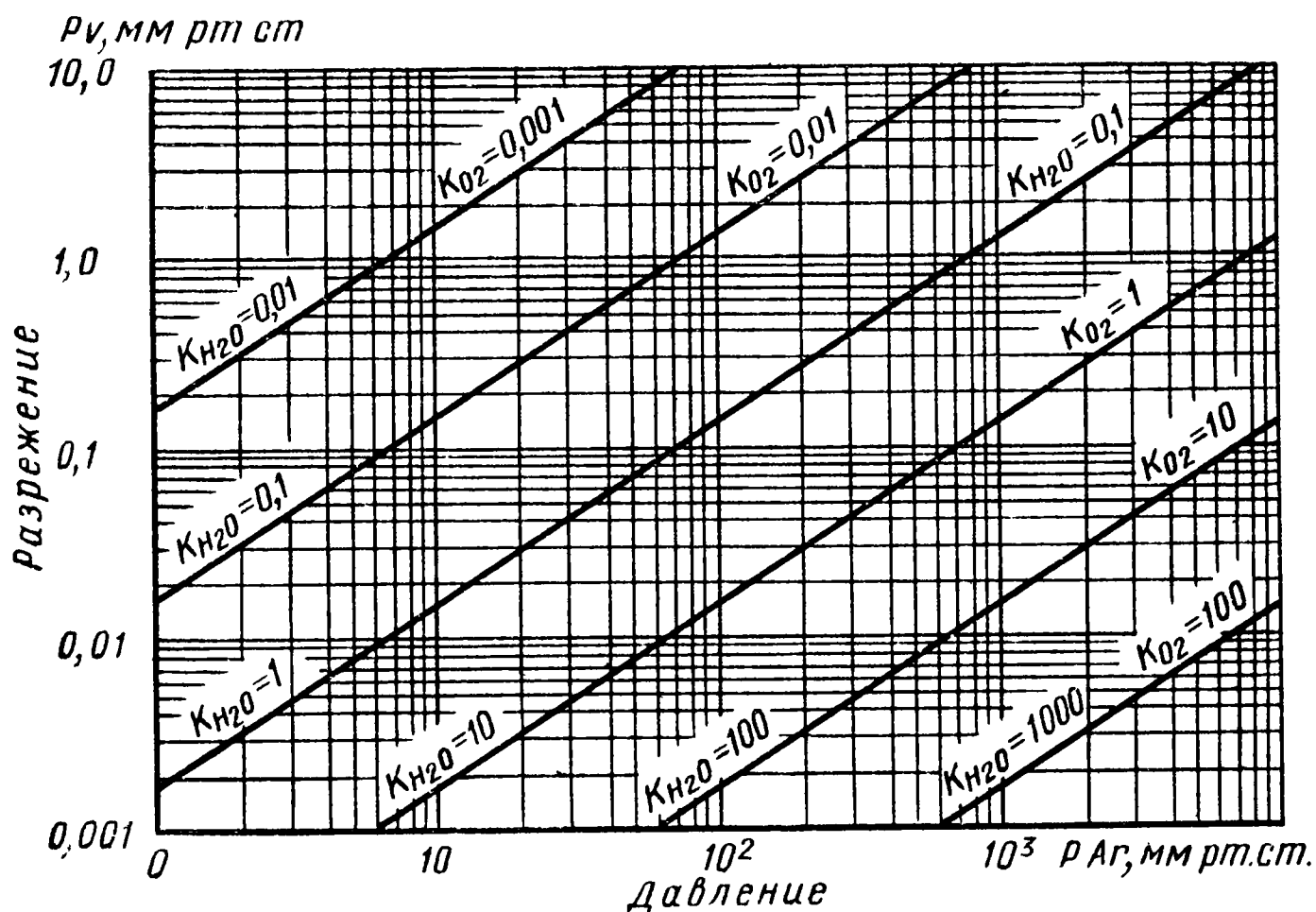


Рис. 35. Зависимость коэффициента K от давления аргона и степени разрежения в камере пайки

Обозначим

$$K_{O_2} = \frac{p_{O_2}^{Ar}}{p_{O_2}^v}; \quad (44)$$

этой величиной удобно оценивать преимущества одной среды перед другой по содержанию в них примесей. Условие предпочтительности аргона перед вакуумом, вакуума перед аргонem, а также условие равноценности этих сред по содержанию в них кислорода запишется соответственно

$$K_{O_2} < 1; K_{O_2} > 1; K_{O_2} = 1.$$

При $C_0 = 0,21\%$, а также при использовании аргона марки А по ГОСТ 10157—62, концентрация кислорода в котором составляет $0,00003\%$, выражение (44) примет вид

$$K_{O_2} = 1,43 \cdot 10^{-4} \left(\frac{p_{Ar}}{p_v} \right). \quad (45)$$

Эта зависимость графически показана на рис. 35, где в качестве осей координат приняты величины p_{Ar} и p_v ; величина K_{O_2} представлена серией наклонных линий. Из графика можно видеть, что если в зоне пайки создать вакуум с остаточным давлением $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. или подвести аргон, давление которого составляет 760 мм рт. ст., то величина K_{O_2} будет равна 10. Следовательно, парциальное давление кислорода в аргоне в 10 раз выше, чем в вакууме, и применение вакуума в этом случае предпоч-

тительнее аргона. Если же в камере пайки создать вакуум с остаточным давлением 1 мм рт. ст. или подвести аргон, давление которого, как и в первом случае, равно 760 мм рт. ст., то величина K_{O_2} составит 0,1 и применение аргона будет более предпочтительным. Линия, соответствующая $K_{O_2} = 1$, разделяет график на две зоны. Выше этой линии находится область, где предпочтительнее использовать аргон, ниже — область предпочтительного использования вакуума.

Для оценки влияния содержания паров воды получена зависимость

$$K_{H_2O} = 1,43 \cdot 10^{-3} \left(\frac{p_{Ar}}{p_v} \right),$$

(46)

которая установлена при условии, что температура вакуумируемого пространства в исходном состоянии составляла 25° С, а концентрация водяных паров при этой температуре равна 21 г/м³. Содержание паров воды в аргоне взято равным 0,03 г/м³. Значения K_{H_2O} представлены на рис. 35 теми же линиями, что и величины K_{O_2} , но смещены на порядок.

В зависимости от характера взаимодействия при образовании спая и, следовательно, направленности изменения свойств взаимодействующих металлов может резко изменяться прочность основного металла под действием расплавленного припоя. Наименьшие изменения наблюдаются в случае взаимодействия металлов, расположенных рядом в периодической системе Д. И. Менделеева и образующих непрерывные твердые растворы. Изменение механических свойств ограниченных твердых растворов приблизительно обратно пропорционально предельной растворимости.

Значения предельной растворимости компонентов припоев в титане приведены в табл. 8, там же указаны интерметаллиды, образующиеся в системах этих металлов с титаном, и их температуры плавления.

8. Растворимость металлов в титане и составы интерметаллидов, образующихся при их взаимодействии

Группа периодической системы	Металл	Предельная растворимость в α - Ti		Предельная растворимость в β - Ti		Отличие атомных диаметров от атомного диаметра титана	Металлические соединения в системе	
		Содержание, % по массе	Температура, °С	Содержание, % по массе	Температура, °С		Состав	Температура плавления, °С
I	Ag	14,6	855	30,5	1040	1,6	TiAg	1040
I	Cu	2,1	798	17,7	990	12,9	Ti ₂ Cu TiCu Ti ₂ Cu ₃ TiCu ₃	990 975 920 885
IV	Sn	22,5	885	35	1600	8,15	Ti ₃ Sn Ti ₂ Sn Ti ₅ Sn ₃ Ti ₆ Sn ₅	1663 1552 1505 1495
VII	Mn	0,5	530	33	1175	11,25	TiMn TiMn ₂	950 1330
VIII	Co	—	685	17	1020	14,7	TiCo ₂ TiCO Ti ₂ CO	1250 1500 1050
VIII	Ni	0,1	770	13	955	15	Ti ₂ Ni TiNi TiNi ₃	984 1310 1380

Ввиду того, что при комнатной температуре растворимость компонентов припоев в α -Ti значительно ниже предельной, указанной в табл. 8, то после пайки припоями, содержащими никель, кобальт, марганец, получить структуру, состоящую из твердого раствора, можно лишь в случае применения весьма продолжительных выдержек и при толщине паяемого материала, которая позволяет рассматривать диффузию компонентов припоя в решетку титана как в бесконечное пространство.

В большинстве встречающихся на практике случаев получающаяся при диффузионной пайке структура шва двухфазная: твердый раствор α -Ti и интерметаллические соединения. Изменение механических свойств сплавов, имеющих в своем составе интерметаллиды, зависит от особенностей выделения второй фазы и характера дисперсионного механизма упрочнения. В результате дисперсных выделений может иметь место как упрочнение, так и разупрочнение сплава. Выделение небольшого количества второй фазы в мелкодисперсном состоянии сопровождается повышением прочности и уменьшением пластичности. Вторая фаза в этом случае вносит

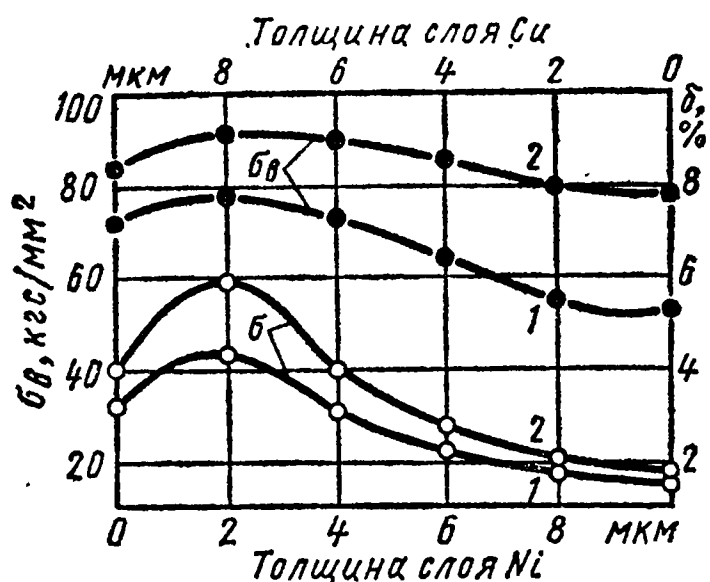


Рис. 36. Механические свойства образцов из сплава ОТ4 в зависимости от толщины медноникелевого покрытия: 1 — после выдержки 30 мин при 1000° С; 2 — после выдержки 2 ч при 1000° С

в зону пайки (как и в случае однокомпонентного припоя), уменьшить степень пересыщения α -Ti.

При применении в качестве припоя многокомпонентных композиций, например при пайке титанового сплава ОТ4, наибольшая прочность наблюдается при толщине медного слоя 8 мкм и никелевого 2 мкм, т. е. при содержании в покрытии 80% меди и 20% никеля (рис. 36).

С ростом толщины покрытия в диффузионной зоне увеличивается количество интерметаллида Ti_3Cu . Увеличением количества интерметаллидов и напряженностью решетки титана объясняется падение его пластичности по мере роста толщины покрытия. Из металлографических и микрорентгеноспектральных исследований паяных швов следует, что их структура и состав отличаются большой неоднородностью. При толщине покрытия 4—8 мкм образуется недостаточное для заполнения зазора количество жидкой фазы, поэтому в паяных швах имеются неспаи. Наличием неспаев обусловлена низкая прочность соединений при малой толщине покрытия. С увеличением толщины покрытия протяженность участков с неспаями уменьшается, что приводит к повышению прочности соединений. При толщине покрытия 10—12 мкм дефекты в виде неспаев отсутствуют, кривая прочности достигает своего максимального значения. С последующим ростом толщины покрытия прочность соединений падает. Это явление, очевидно, обусловлено тем, что при большой толщине покрытия (14—16 мкм) образуется избыточное количество жидкой фазы, которая скапливается в галтелях. Для изотермической кристаллизации во всем объеме таких галтелей требуется более длительная выдержка, чем для капиллярной части шва, поэтому в структуре галтелей обычно преобладает эвтектическая фаза. Благодаря низким механическим свойствам эвтектики разрушение паяных соединений начинается с галтельных участков,

искажения в кристаллическую решетку металла. Увеличение количества выделяющейся избыточной фазы может послужить причиной резкого уменьшения пластических и прочностных свойств, если эта фаза выделяется в виде сетчатого каркаса. Менее опасны интерметаллиды в случае их выделения в виде скоагулированных включений.

Уменьшение количества выпадающих интерметаллических соединений, а следовательно, и снижение охрупчивания титана может быть достигнуто за счет различных приемов. Из них для пайки представляют интерес два:

выбор компонентов припоя, которые имеют увеличенную растворимость в α -Ti; использование в качестве припоя многокомпонентных композиций, позволяющих при таком же количестве припоя, вводимого

Столь большая зависимость механических свойств паяного соединения от количества жидкой фазы в шве требует оптимальной толщины слоев гальванических покрытий с точностью ± 1 мкм.

На основании анализа особенностей формирования паяных соединений титана можно заключить, что толщина покрытий оптимальна, если количество образующейся жидкой фазы достаточно для заполнения капиллярного зазора при наличии сжимающей нагрузки.

Оптимальную толщину покрытия обычно подбирают эмпирическим путем. Однако практика показала, что оптимальная толщина покрытия может быть различной. Это связано с тем, что количество жидкой фазы, заполняющей зазор, зависит от конструктивных особенностей соединяемых элементов и температурных условий процесса.

Количественное соотношение между этими величинами имеет вид

$$\sigma_{\text{ж}} = \frac{100}{C} \cdot \frac{F}{f} \cdot \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{ж}}} \delta_{\text{п}} K, \quad (47)$$

где F — площадь поверхности, занимаемая покрытием; f — площадь паяного соединения; $\gamma_{\text{п}}$, $\gamma_{\text{ж}}$ — плотность покрытия и жидкой фазы; $\delta_{\text{п}}$ — толщина покрытия; C — процентное содержание металла — покрытия в жидкой фазе; K — коэффициент, учитывающий часть жидкой фазы (расходуемой на формирование паяных соединений), зависящий от интенсивности испарения и других факторов.

При пайке равноудаленных одно от другого ребер к основанию величины F и f можно выразить следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} F &= nl\lambda; \\ f &= nlt, \end{aligned}$$

где n — количество ребер; l — длина ребер (совпадающая с длиной основания); t — ширина ребра; λ — шаг ребер.

Тогда в зависимости (47) вместо множителя $\frac{F}{f}$ появится множитель $\frac{\lambda}{t}$.

Поскольку оптимальное количество жидкой фазы совпадает с количеством, необходимым для заполнения ею капиллярного зазора, то можно записать следующие условия:

$\delta_{\text{п}} > \delta_{\text{ж}}$ — количество припоя, при котором образуются неспаи; $\delta_{\text{п}} < \delta_{\text{ж}}$ — количество припоя, при котором появляются увеличенные размеры галтелей; $\delta_{\text{п}} = \delta_{\text{ж}}$ — оптимальное количество припоя.

Зависимость (47) и последние условия нельзя использовать для определения оптимального количества жидкой фазы, так как они содержат неизвестные величины $\delta_{\text{п}}$ и K . Поэтому применяют модельный пересчет. Изменение функции $\delta_{\text{ж}}$ от переменных C , F , f , $\gamma_{\text{ж}}$, $\delta_{\text{п}}$, K берут в виде полного дифференциала, в выражение которого подставляют значения частных производных функций (47) и принимают условие $d\delta_{\text{ж}} = 0$ и $dK = 0$. После замены бесконечно малых приращений конечными получают зависимость

$$\Delta\delta_{\text{пн}} = \delta_{\text{пм}} \left(\frac{\Delta f}{f_{\text{м}}} - \frac{\Delta F}{F_{\text{м}}} + \frac{\Delta C}{C_{\text{м}}} + \frac{\Delta\gamma}{\gamma_{\text{м}}} \right), \quad (48)$$

где $\delta_{\text{пн}}$ и $\delta_{\text{пм}}$ — соответственно оптимальная толщина покрытия натуре и модели; $f_{\text{м}}$, $F_{\text{м}}$, $C_{\text{м}}$, $\gamma_{\text{м}}$ — конструктивные и технологические параметры модели; $\Delta\delta_{\text{пн}}$, Δf , ΔF , ΔC , $\Delta\gamma$ — разность соответствующих величин натуре и модели.

При расчете оптимальной толщины покрытия для случая пайки нескольких равноудаленных одно от другого ребер к основанию следует в зависимость (48) вместо величин F и f и их приращений подставлять соответственно величины λ и t и их приращения.

Изучение кинетики охрупчивания титана в процессе пайки показало, что снижение его пластичности происходит в результате нагрева, вызывающего рост зерна; взаимодействия с защитной атмосферой и с расплавленным припоем.

Рост зерна титана марки BT1 зависит от выдержки при температуре пайки (980—1000° С). Экспериментально установлено следующее:

Время изотермической выдержки	5 с	1 ч	2 ч	3 ч
Средний диаметр зерна, мм	0,16	0,4	0,54	0,62

Увеличение размеров зерна аппроксимируется зависимостью

$$D = kt^n,$$

где D — средний диаметр зерна, мм; t — время выдержки, ч; k и n — постоянные.

В рассматриваемом случае величины k и n равны и имеют значение 0,4.

Несмотря на значительный рост зерна при пайке титана, существенного уменьшения пластичности при этом не происходит (рис. 37). Наиболее ощутимо уменьшение пластичности при взаимодействии титана с газами защитной атмосферы. С увеличением выдержки происходит повышение содержания кислорода в образцах.

При одновременно происходящем в титане росте зерна, воздействии защитной среды и припоя в изменении пластичности наблюдаются три стадии (кривая 3). На первой стадии пластичность уменьшается, на второй возрастает, на третьей снова уменьшается. Исследования показали, что при выдержке 5 с на поверхности образцов образуется слой толщиной 40—50 мкм с литой структурой. При испытании таких образцов на растяжение в этом слое появляется сетка трещин. С увеличением выдержки толщина слоя с литой структурой уменьшается. При 15—30-минутной выдержке она сохраняется лишь на отдельных участках образца. Количество трещин на поверхности образца при этом уменьшается, а глубина их проникновения возрастает. Этому состоянию соответствует минимум на кинетической кривой пластичности. При выдержке свыше 30 мин литой структуры и поверхностных трещин на образцах не обнаруживается. На этой стадии происходит восстановление пластичности титана, максимальное значение которой достигается при выдержке 2 ч.

Влияние условий пайки и компонентного состава припоев на свойства паяных соединений свидетельствует о том, что для обеспечения высокой прочности паяных изделий необходимо оптимальное сочетание компонентного состава основного металла и припоя, конструктивных факторов, а также режима и условий пайки.

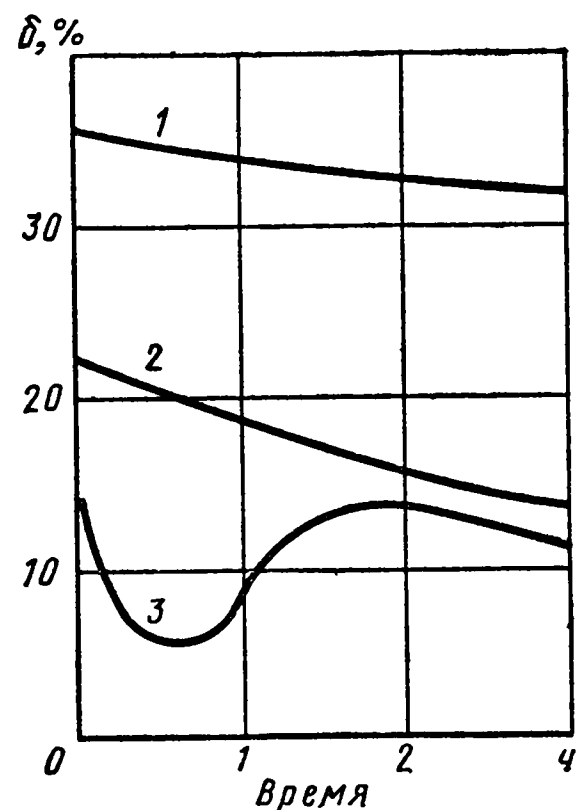


Рис. 37. Кривые относительного удлинения титана BT1-1 в зависимости от выдержки при температуре 1000° С в вакууме $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.;

1 — под влиянием роста зерна; 2 — под влиянием роста зерна и газовой атмосферы в камере пайки; 3 — под совместным воздействием роста зерна, газовой среды и расплава припоя

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айнбиндер С. Б., Клокова Э. Ф. О механизме возникновения сцепления при холодной сварке металлов. «Изв. АН Латв. ССР», 1954, № 10, с. 113—127.
2. Айнбиндер С. Б. Новые способы сварки давлением. Изд-во А. Н. Латв. ССР, Рига, 1960, 115 с.
3. Айнбиндер С. Б., Клокова Э. Ф. Некоторые вопросы теории сцепления металлов при совместном пластическом деформировании. «Изв. АН Латв. ССР», № 12, 1958, с. 141—155.
4. Айнбиндер С. Б. Холодная сварка металлов. Изд-во АН ССР, 1957, 163 с.
5. Архаров В. И., Лучкин Г. П. Об участии азота в процессе высокотемператур-

ного окисления титана в воздухе. — ДАН СССР, 83, № 6, 1952, с. 837—839.

6. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М., Физматгиз, 1963, 472 с.

7. Бакши О. А., Шрон Р. З. Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой. — «Сварочное производство», 1962, № 5, с. 6—10.

8. Ван-дер-Мерве Дж. Х. Несоответствие кристаллических решеток и силы связи на поверхности раздела между ориентированными пленками и подложками. — В кн.: Монокристаллические пленки. М., «Мир», 1966, с. 172—201.

9. Глебов Г. Д. Поглощение газов активными металлами. М., Госэнергоиздат, 1961, 184 с.
10. Гликман Л. А. Коррозионно-механическая прочность металлов. М., Машгиз, 1955, 176 с.
11. Дерягин Б. В., Кротова И. А. Адгезия, исследования в области прилипания и клеящего действия. Изд-во АН СССР, 1949, 244 с.
12. Дерягин Б. В., Смилга В. П. Электронная теория адгезии металлов, соединяемых полупроводниковой прослойкой. — ДАН СССР, 121, 1958, с. 877—880.
13. Екатова А. С. Некоторые особенности кристаллизации паяных швов. — В кн.: Пайка в машиностроении. Ч. I. МДНТП, 1967, с. 112—118.
14. Еременко В. Н. Титан и его сплавы. Киев. Изд-во АН УССР, 1955, 400 с.
15. Жемчужина Е. А. Исследование смачивания вольфрама и молибдена расплавами чистого золота и чистого серебра, а также сплавами этих металлов с платиной. — В кн.: Физическая химия металлургических процессов и систем. М., «Металлургия», 1966, с. 420—427.
16. Казакевич З. А., Жемчужина Е. А. Смачивание тугоплавких металлов серебряномедным сплавом. — В кн.: Физическая химия металлургических процессов и систем. М., «Металлургия», 1966, с. 316—321.
17. Карпенко Г. В. К вопросу о механизме разрушения напряженного металла под воздействием жидкого металла — В кн.: Труды семинара по жаростойким материалам. Бюл. № 4, Киев, Изд-во АН УССР, 1959, с. 79—85.
18. Карпенко Г. В. Некоторые положения теории влияния жидких металлов на механические свойства твердых (конструкционных) металлов. — В кн.: Вопросы машиноведения и прочности в машиностроении. Вып. 8. Киев, Изд-во АН УССР, 1962, с. 5—10.
19. Кишкин А. Т., Николаенко В. В., Ратнер С. И. Прочность металлов при контакте с расплавленными припоями. — ЖТФ, 24, 8, 1954, с. 1455—1466.
20. Костецкий Б. И., Ивтенко И. П. Дислокационная модель процесса холодной сварки металлов. — «Автоматическая сварка», 1964, № 5, с. 18—20.
21. Кротова И. А. О склеивании и прилипании. М., Изд-во АН СССР, 1960, 168 с.
22. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. Пер. с англ. М., «Металлургия», 1955, 312 с.
23. Кудинов В. В., Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х. К оценке энергетических условий образования соединения между расплавленными частицами и поверхностью твердого тела. — «Физика и химия обработки материалов», 1968, № 4, с. 51—58.
24. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Металловедение сварки. М., Машгиз, 1954, 272 с.
25. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. О выборе температуры пайки. — «Сварочное производство», 1961, № 3, с. 11—14.
26. Лихтман В. И., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика металлов. М., Изд-во АН СССР, 1962, 303 с.
27. Лихтман В. И., Ребиндер П. А., Карпенко Г. В. Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов. М., Изд-во АН СССР, 1954, 208 с.
28. Лоцманов С. Н., Петрунин И. Е. Николаев Г. А. Пайка металлов, М., «Металлургия», 1966, 279 с.
29. Макквиллэн А. Д., Макквиллэн М. К. Титан. М., Metallurgizdat, 1958, 458 с.
30. Мюллер Р. Л. Валентная теория жидкости и текучесть в критической области температур для тугоплавких стеклообразующих веществ. — Журнал прикладной химии, т. 28, № 10, 1955, с. 1077—1087.
31. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах. Киев, «Наукова думка», 1972, 198 с. О природе и линейной скорости контактного плавления. — «Изв. вузов, Физика», 1959, № 5, с. 128—133. Авт.: Савинцев П. А., Аверичева А. Е., Эленко В. Я. и др.
32. Петрунин И. Е. О характере границ основной металл — расплавленный припой. — В кн.: Пайка металлов в машиностроении. Ч. I. Рига, Латинти, 1968, с. 3—13.
33. Петрунин И. Е., Петухов В. Р. К оценке длительности изотермической кристаллизации при образовании растворено-диффузионного спая. Научные труды ВЗМИ, т. 2. М., 1973.
34. Петрунин И. Е. О строении спаев и пайке с большими зазорами. — В кн.: Новые материалы и технология пайки в машиностроении. ЦП НТО Машпром. М., 1971, с. 8—14.
35. Петрунин И. Е., Гржимальский Л. Л. О взаимодействии вольфрама с медью, марганцем, серебром и оловом. — «Металловедение и термическая обработка», 1969, № 1, с. 21—24.
36. Петрунин И. Е., Черницын А. И. К вопросу о возможности бездиффузионного спая. — В кн.: Теоретические основы пайки. Всесоюзный заочный машиностроительный институт. М., 1973, с. 4—9.
37. Петрунин И. Е., Гржимальский Л. Л. К вопросу о самофлюсовании припоев. — В кн.: Научные труды ВЗМИ, вып. 6. М., «Высшая школа», 1968, с. 194—205.
38. Петрунин И. Е., Куфайкин А. Я., Шибалов М. В. Определение технологических параметров при пайке титана в защитной среде. — В кн.: Новое в процессах горячей обработки металлов. М., «Машиностроение», 1971, с. 129—138.
39. Потак Я. М. и Щеглаков И. М. Влияние расплавленных металлических покрытий на механические свойства сталей и сплавов. — ЖТФ, 25, 5, 1955, с. 697—907.
40. Ростокер У., Мак-Когг Дж., Маркус Г. Хрупкость под действием жидких металлов. Пер. с англ. Под ред. Е. Д. Щукина. М., Изд. иностр. лит. 1962, 192 с.
41. Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л. Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов. — «Неорганические материалы», I, № 1, 1965, с. 29—36.
42. Рябченко А. В. Коррозионно-усталостная прочность стали. М., Машгиз, 1953, 180 с.
43. Семенов А. П. О двух взглядах на явление схватывания металлов. — «Автоматическая сварка», № 3, 1961, с. 52—60.
44. Семенов А. П. Схватывание металлов — основа холодной сварки. — «Автоматическая сварка», № 5, 1964, с. 4—9.
45. Томашов Н. Д. Теория коррозии и защиты металлов. Изд-во АН СССР, 1960, 591 с.
46. Фролов В. В. Явления смачивания металлических поверхностей расплавлен-

ными металлами. — В кн.: Защита металлов от коррозии и образования накипи. М., Машгиз, 1953, с. 48—61.

47. **Шеин Ю. Ф., Петрунин И. Е.**, Влияние степени вакуумирования на растекаемость припоев. — В кн.: Пайка в промышленности. Латинти, Рига, 1968, с. 78—87.

48. **Davis H. C.**, Silver 'Aluminium Alloys for Brazing Titanium and its Alloys. I. Metallurgia, 60, 361, 1959, p. 205—211.

49. **Funk E. R., Udin H.**, Brasing. Hydromechanics. Welding I., 31, N 6, 1952, p. 310—316

50. **Harding W. B.** Solderability Testing, Plating, 52, N 10, 1965, p. 971—981.

51. How to braze titanium, stell, 141, N 4, 1957.

52. **Milner D. K.** A survey of the Scientific principles related to wetting und spreading, Britisch Welding I., N 3, 1958, p. 90—105.

53. **Parks I. M.**, Recrystallization Welding. — The Welding Journal, v. 32, 5, 1953, pp. 209—222.

54. **Rhys D. W., Berry R. D.**, The Development of Palladium Brazing Alloys. Metallurgia, 66, N 398, 1962, p. 255—263.

55. **Rover L.**, Lames minces et epitaxie, I. de Physique et le Radi un 17, N 3, 1956.

56. **Thawaite C. I.** Testing for Solderability Britisch Welding I., 12, N 11, 1965.

57. **Whitehead I. R.** Surface deformation and friction of metals at light loads, Proc., of the Royal Society, 201, p. 109—124, 1950.

Наряду с классификацией пайки по видам спаев, которая определяется физико-химическими признаками процессов, протекающих на межфазной границе паяемый материал — припой, в соответствии с ГОСТ 17349—71 введено деление по способам пайки. В основу этого деления положены физико-химические, металлургические и технологические признаки процессов образования паяного соединения. По условию заполнения зазора пайка подразделяется на капиллярную и некапиллярную.

Пайка при наличии капиллярных зазоров является одним из наиболее распространенных видов пайки. Как уже отмечалось, качество соединений при пайке зависит от правильного выбора припоя, флюса, состояния поверхности, рационального конструирования паяных соединений, технологии заполнения зазора припоем и др. От величины зазора зависят химический состав, структура шва, прочность соединения и экономичность процесса пайки.

Зазоры при пайке могут колебаться в широких пределах. Обычно выполняют соединения с зазором до 0,5—0,8 мм. По величине зазоры подразделяют на три вида: большие (0,2—0,8 мм); малые (0,2—0,05 мм) и без зазора с прессовой посадкой. В последнем случае высокого качества соединений достигают при нанесении на паяемые поверхности продольных рисок глубиной 0,2—0,3 мм. Особенно эффективно с точки зрения затекания припоя нанесение треугольных рисок, в которых капиллярное давление в 3 раза больше.

Условия заполнения зазора припоем при наличии химического взаимодействия теоретически мало изучены. Одним из обстоятельств, осложняющих это изучение, является отсутствие достаточно достоверных данных по поверхностным и межфазным натяжениям как для чистых веществ, так и для сплавов. Разработаны различные экспериментальные методы, позволяющие с максимальной простотой и точностью определять высоту подъема припоя по капиллярам в зависимости от величины зазора и других параметров (см. гл. 1) [2, 9].

При соединении разнородных металлов, особенно телескопически, необходимо учитывать изменение величины зазора (Δa), связанное с различием в коэффициентах линейного расширения. Изменение величины зазора при нагреве в определенном интервале температур ΔT для телескопического соединения можно приближенно оценить из уравнения

$$\Delta a = r \Delta T (\alpha_2 - \alpha_1),$$

где r — внешний радиус внутренней трубы; α_1, α_2 — температурные коэффициенты линейного расширения.

При использовании местного источника нагрева при пайке деталей различной массы необходимо устанавливать исходный зазор так, чтобы он при температуре пайки достигал оптимальной величины.

При пайке швов большой площади с односторонней подачей припоя возможны значительные непропаи, которые связаны с процессами массопереноса на межфазной границе, приводящими к изменению вязкости и температуры плавления припоя. Во избежание непропаев в этом случае рекомендуется предварительно наносить припой в виде фольги или в виде гальванического покрытия (0,05—0,1 мм).

При выборе оптимального зазора при пайке надо исходить не только из капиллярных свойств припоя, но и из характера изменения кристаллической структуры, химического состава, и как следствие, прочности паяных соединений в зависимости от величины зазора.

Рекомендуемые величины зазоров при пайке приведены в табл. 1.

1. Рекомендуемая величина зазоров при пайке металлов

Паяемый металл	Припой (основа и некоторые основные легирующие элементы)	Величина зазора	Паяемый металл	Припой (основа и некоторые основные легирующие элементы)	Величина зазора
Алюминий и его сплав	Al	0,15—0,25	Стали низкоуглеродистые	Cu	0,01—0,05
	Zn	0,1—0,25			
Медь и ее сплавы	Латунь	0,04—0,20	Сталь нержавеющая	Cu	0,01—0,1
	Cu—P	0,04—0,20		Латунь	0,02—0,1
	Ag—Cu—P	0,02—0,15		Cu—Au, Ag—Mn	0,05—0,1
	Pb—Sn, Sn—Sb—Ag	0,05—0,3		Au—Cu	0,08—0,2
	Sn—Pb, Sn—Sb	0,1		Ni—Cr	0,65—0,1
	Ag—Cd—Cu—Zn	0,08—0,2	Титан и его сплавы	Cu, Cu—P, Cu—Zn	0,03—0,05
				Ag, Ag—Mn	0,03
Никелевые сплавы	Ni—Cr	0,05—0,1	Вольфрам	Ni—Cr	0,05—0,1

КОНТАКТНО-РЕАКТИВНАЯ ПАЙКА

При этом виде пайки припой образуется в результате контактного плавления паяемых материалов, покрытий на них или промежуточных прослоек. Контактное плавление наблюдается у металлов, образующих эвтектики или твердые растворы с минимумом на диаграмме плавкости. Схема взаимодействия чистых металлов А и В при контактном плавлении показана на рис. 1. Образование жидкости при температуре T_1 обусловлено стремлением системы к уменьшению свободной энергии. Контактное плавление металлов можно рассматривать как частный случай фазовых переходов аналогично тому, как при диффузии металлов в твердом состоянии образуются промежуточные фазы в соответствии с диаграммой состояния. Процесс контактного плавления состоит в основном из двух стадий:

подготовительной, заключающейся в образовании насыщенных твердых растворов;

стадии образования зародышей жидкой фазы, их роста и последующего растворения в слое расплава взаимодействующих металлов.

Подготовительная стадия включает в себя процессы взаимодействия в твердой фазе на активных центрах (образование химической, в частности, металлической связи) и последующие процессы гетеродиффузии. Так как процессы взаимодействия протекают при относительно высоких температурах, эта стадия по времени не является лимитирующей. В тех областях контакта, где созданы условия для протекания диффузии, через некоторый промежуток времени образуются зоны, в которых достигается пересыщение до концентраций C_1^P и C_3^P (рис. 1, б). В работе [15] предполагается, что образование пересыщенных твердых растворов происходит в областях размеров $3 \cdot 10^{-7}$ см (так называемый «квант плавления»).

Образование устойчивых зародышей жидкой фазы будет приводить к их последующему росту за счет растворения в них основного металла. Кинетика распространения жидкости по поверхности контакта оценивается, в частности, на основании

моделей, предложенных А. И. Колмогоровым и развитых в дальнейшем для анализа процесса объемной кристаллизации:

$$\frac{S_t}{S_0} = 1 - \exp\left(-\frac{n\pi v^2 t}{3}\right),$$

где S_0 — исходная поверхность контакта; S_t — поверхность контакта, охваченная процессом контактного плавления к моменту времени t ; n — скорость образования центров плавления; v — линейная скорость распространения жидкой фазы по поверхности контакта.

Наличие окислов на поверхности взаимодействующих фаз будет оказывать существенное влияние на скорость распространения жидкой фазы по поверхности и соответственно на кинетику контактного плавления. Время протекания первой стадии обычно незначительно и для практических целей пайки не имеет большого значения. Так, в работе [15] для систем Sn—Bi время, необходимое для образования

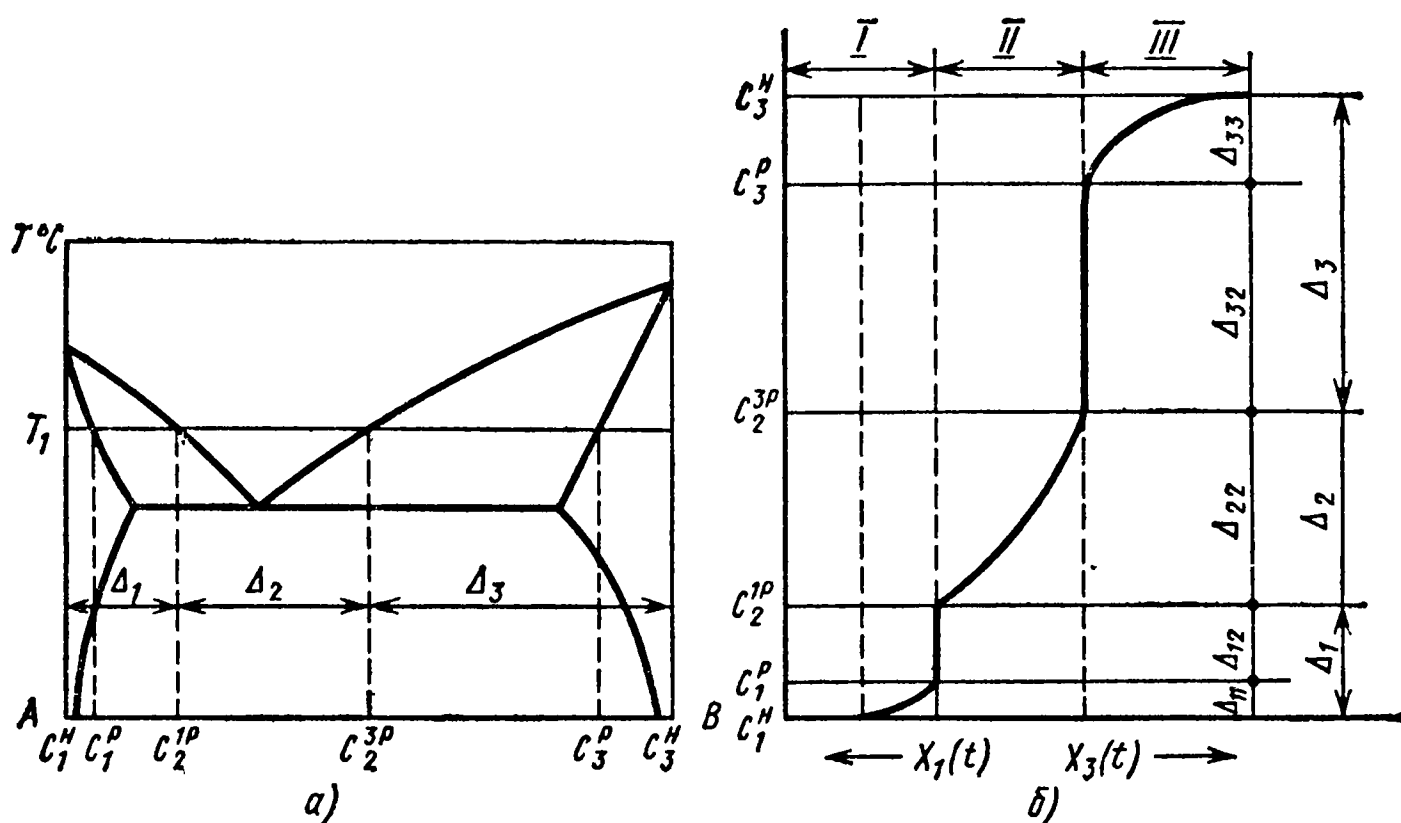


Рис. 1. Схема взаимодействия чистых металлов А и В при контактном плавлении:

а — диаграмма состояния эвтектического типа; б — схематическое изображение распределения концентраций при контактном плавлении

таких твердых растворов, определено 10^{-3} с, однако видимые признаки плавления в этой системе обнаруживались только через 0,5 с. Наибольший интерес для пайки представляет кинетика перемещения межфазных границ (скорость процесса), лимитируемая массопереносом, и знание концентрационных полей в зоне контакта. Достаточно строгое математическое описание кинетики контактного плавления для стационарного случая приведено в [18], т. е. при постоянной толщине прослойки расплава. Последнее достигается за счет приложения к соединяемым металлам постоянного во времени внешнего давления и создания условий, при которых вновь образующаяся в единицу времени жидкость полностью удаляется.

Расчет нестационарной кинетики контактного плавления (перемещающиеся границы) рассмотрен ниже [3]. Пренебрегая процессами взаимодействия в твердом состоянии и процессами образования зародышей жидкой фазы, считаем, что в момент времени $t = 0$ при температуре T_1 образуется бесконечно тонкая прослойка жидкости и распределение компонентов в системе соответствует рис. 1, б. Предполагается, что растворение лимитируется процессами диффузии в жидкости, а не скоростью перехода атомов твердого металла в жидкость, так как это характерно для подавляющего большинства систем.

Если пренебречь конвекцией жидкого металла, то для определения концентрационных полей во всех фазах и законов движения границ раздела $x_1(t)$ и $x_3(t)$ в одно-

мерном случае необходимо решить уравнение диффузии для каждой фазы [3]

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}; \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где C_i — концентрация компонентов B в фазе i ; $D_i = C_i D_{iA} + (1 - C_i) D_{iB}$ — усредненный коэффициент диффузии в фазе i ; D_{iA} и D_{iB} — парциальные коэффициенты диффузии в фазе i (принимая, что D_i не зависит от C_i);

при граничных условиях:

для фазы 1

$$\left. \begin{aligned} C_{1/x=-\infty} &= C_1^H; \\ C_{1/x=x_1(t)} &= C_1^P; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

для фазы 2

$$\left. \begin{aligned} C_{2/x=x_1(t)} &= C_2^{1P}; \\ C_{2/x=x_3(t)} &= C_2^{3P}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

для фазы 3

$$\left. \begin{aligned} C_{3/x=x_3(t)} &= C_3^P; \\ C_{3/x=\infty} &= C_3^H; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

при условиях массобаланса на движущихся границах

$$x_i(t) (C_2^{iP} - C_i^P) \Big| = \left[\frac{N_2}{N_i} D_2 \frac{dC_2}{dx} - D_i \frac{dC_i}{dx} \right]_{x=x_i(t)}, \quad (5)$$

где N_i и N_2 — число атомов в единице объема соответствующих фаз и начальных условиях

$$x_1(t) \Big|_{t=0} = x_3(t) \Big|_{t=0}. \quad (6)$$

Решая уравнение диффузии (1) при граничных и начальных условиях (2) — (4), (6) и условии массобаланса (5), получаем уравнения для определения концентрации в трех фазах

$$C_1 = C_1^H + \Delta_{11} \operatorname{erfc}(-x/2\sqrt{\tau_1}) / \operatorname{erfc}(-x_1(t)/2\sqrt{\tau_1}); \quad (7)$$

$$C_2 = C_2^{1P} + \Delta_{22} \frac{\operatorname{erfc}[x_1(t)/2\sqrt{\tau_2}] - \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{\tau_2})}{\operatorname{erfc}[x_1(t)/2\sqrt{\tau_2}] - \operatorname{erfc}(x_3(t)/2\sqrt{\tau_2})}; \quad (8)$$

$$C_3 = C_3^H - \Delta_{33} \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{\tau_3}) / \operatorname{erfc}[x_3(t)/2\sqrt{\tau_3}]; \quad (9)$$

где

$$\operatorname{erfc}(Z) = \frac{2}{\pi} \int_Z^\infty \exp(-Z^2) dZ;$$

$$\Delta_{11} = C_1^P - C_1^H; \quad \Delta_{22} = C_2^{3P} - C_2^{1P}; \quad \Delta_{33} = C_3^H - C_3^P.$$

Скорость движения границ определяют из уравнения

$$x_1(t) = -2\beta_1 \sqrt{D_2 t}; \quad x_3(t) = 2\beta_3 \sqrt{D_3 t}, \quad (10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \beta_i &= \frac{P_i}{\sqrt{P_1 + P_3}} \left[1 - \frac{Q_i (P_1 + P_3)^2 \varepsilon_i^2}{P_i^2 (P_i + P_1 + P_3)} \right]; \quad i = 1, 3; \\ P_i &= \frac{1}{2} \cdot \frac{N_2 \Delta_{22}}{N_i (\Delta_{i2} + \Delta_{ii})}; \quad Q_i = \frac{\Delta_{ii}}{2 (\Delta_{i2} + \Delta_{ii})}; \\ \varepsilon_i &= \sqrt{D_i / D_2}; \quad \Delta_{i2} = |C_2^{iP} - C_i^P|. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Численные оценки показывают, что если $\Delta_{22} = C_2^{\text{жр}} - C_2^{\text{тп}}$ не слишком мало ($\Delta_{22} \geq 1$), то второй член для β_i в квадратных скобках уравнения (11) весьма мал ($< 10^{-3}$). Поэтому в достаточном приближении им можно пренебречь, т. е. можно не учитывать диффузию в твердую фазу. Таким образом, скорость $x_i(t)$ перемещения границ при контактном плавлении может быть определена из выражения

$$|x_i(t)| = 2 \sqrt{D_2 t} \frac{P_i}{\sqrt{P_1 + P_3}}, \quad (12)$$

т. е. получена параболическая зависимость ширины зоны сплавления для каждого из взаимодействующих металлов от времени. Совпадение расчетов по уравнению (12) с экспериментом достаточно хорошее. Расчет показывает, что даже в случае большого времени взаимодействия ($T = 10^3$ с) при $D_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ см²/с, а D_1 или $D_3 = 10^{-10}$ см²/с (т. е. $D_2 \gg D_i$) ширина диффузионного слоя в твердой фазе составляет несколько десятков межатомных расстояний. В случае, если отношение D_2/D_i не слишком велико, а разность $\Delta_{22} = C_2^{\text{жр}} - C_2^{\text{тп}}$, которая является термодинамическим стимулом для диффузии в жидкости, достаточно мала, т. е. если второй член в уравнении (12) близок к единице, то диффузионные потоки в обе фазы (твердую и жидкую) оказываются сравнимыми. В этом случае необходимо учитывать диффузию в твердую фазу.

Из анализа уравнения (12) следует, что растворимость взаимодействующих металлов в расплаве оказывает влияние на скорость контактного плавления. Учитывая только концентрационный член в уравнении (12), можно записать, что

$$x_1(t) \approx k_1 \approx \alpha \gamma, \quad x_3(t) \approx k_3 \approx \frac{\alpha}{\gamma},$$

$$\text{где } \alpha = \sqrt{\frac{\Delta_{22}}{1 - \Delta_{22}}}; \quad \gamma = \sqrt{\frac{\Delta_3}{\Delta_1}}.$$

Таким образом, чем больше значение k , тем выше скорость контактного плавления. Численные оценки показывают, что скорость контактного плавления в системе Ti—Cu при 900° С больше ($k \approx 0,392$), чем в системе Ti—Fe при 1100° С ($k_1 \approx 0,188$), и соответственно больше, чем в системе Nb—Ni при 1200° С ($k \approx 0,122$), что и подтверждается экспериментальными данными. Меньшая скорость роста прослойки жидкой фазы при контакте Nb с Ni (1200° С) соответствует относительно меньшей растворимости Nb в Ni по сравнению с взаимной растворимостью Ti в Fe (при 1100° С) и Cu в Ti (при 900° С) [9].

Различие в скорости перемещения межфазных границ $x_1(t)$ и $x_3(t)$ может быть существенным. Это надо учитывать при конструировании паяных соединений. Так, при пайке Zr со сталью более интенсивное растворение Zr в жидкой фазе ограничивает использование Zr в виде фольги.

Исследования показали, что контактное плавление возможно и при взаимодействии элементов, входящих в состав контактирующих металлов, причем время до начала контактного расплавления возрастает с увеличением числа компонентов. При контактном плавлении образование жидкой фазы происходит прежде всего по дефектам структуры: границам зерен, субграницам и т. д. контактирующих металлов, так как коэффициенты диффузии по этим дефектам существенно превышают объемные коэффициенты диффузии. Вклад диффузии по границам будет увеличиваться со снижением температуры взаимодействия. Процесс контактного плавления зависит также от кристаллографической ориентации контактирующих граней, что обусловлено различной энергией этих граней.

При пайке контактное плавление может быть осуществлено как при непосредственном контактировании паяемых металлов, так и при использовании промежуточных прокладок или покрытий на одном или обоих взаимодействующих металлах и дающих эффект контактного плавления на одном или обоих взаимодействующих металлах. Основной технологической особенностью контактно-реактивной пайки является необходимость регулирования количества жидкой фазы. Ширину жидкой прослойки стремятся свести к минимуму, так как кристаллизующийся сплав может быть малопластичен, что особенно важно в случае образования интерметаллидов в шве.

Контактно-реактивная пайка Al и его сплавов с использованием в качестве покрытия Ag и Cu нашла применение как бесфлюсовый способ пайки, который позволяет получать прочные и коррозионностойкие соединения. В этих случаях Ag обычно в виде прокладки толщиной 0,05—0,12 мм помещается между деталями, к которым прикладывают усилие поджатия 70—350 кгс/см². После этого узел нагревают до температуры плавления эвтектики Ag—Al (558° С). Серебряное покрытие с успехом было применено при пайке алюминиевого сплава 6061-T6 в конструкции космического корабля «Аполлон» [22]. Пайка производилась в контейнере с атмосферой Ag высокой чистоты при температуре 538° С в течение 60 мин при давлении 35 кгс/см². При нагреве до температуры пайки давление составляло 70 кгс/см². Следует отметить, что при пайке Al и сплава АМг6 в парах Mg были получены коррозионностойкие соединения с примерно одинаковой прочностью как при использовании Ag, так и Cu-покрытий [17]. Увеличение прочности при пайке за счет выдавливания из зоны соединения хрупкой эвтектики с успехом применяется при контактно-реактивной пайке Al со сталями [9]. Контактно-реактивную пайку широко используют для соединения сплавов Cu между собой и со сталями. Применение покрытия из Ag позволяет получать соединения при 800° С, имеющие относительно высокую прочность и пластичность за счет образования Ag—Cu-эвтектики. Пайка Cu с нанесенным на поверхность тонким слоем Ag (5—15 мкм) при достаточно быстром нагреве (например, электроконтактным способом) может быть выполнена на воздухе без флюса и специальных газовых сред [9]. Нанесение тонкого Ag-покрытия (1,2—6 мкм) на латунные детали обеспечивает процесс пайки при 700° С. Паяный шов должен быть достаточно тонким, так как образующаяся Ag—Cu—Zn-эвтектика малопластична из-за наличия в ней хрупкой β (Ag—Cu)-фазы. Следует отметить, что применение контактно-реактивной бесфлюсовой пайки латуней с серебряным покрытием без припоя или с припоями ПСр 72, ПСр 45 при нагреве в печи снижает пористость в паяных швах по сравнению с газопламенной капиллярной пайкой с флюсом 209. В последнем случае повышенную пористость связывают с непропаями, обусловленными высоким давлением паров Zn [10].

При контактно-реактивной пайке Ti и его сплавов в основном используются Cu и Ni-покрытия, причем наилучшие результаты были получены при сочетании контактно-реактивной пайки с диффузионной, в процессе которой происходит коагуляция интерметаллидов (Ti_2Ni ; Cu_3Ti ; Cu_3Ti_2) и снижение их содержания в шве, приводящие к возрастанию механических свойств.

Контактно-реактивную пайку с успехом применяют и при соединении разнородных металлов, металлов с полупроводниками и т. д. При пайке Ti со сталью (усилие поджатия $\leq 0,1$ кгс/мм²) образующаяся жидкая фаза эвтектического состава после кристаллизации обеспечивает получение соединений с достаточно стабильными механическими свойствами. Прочность шва ниже, чем у титана, однако равнопрочные соединения могут быть получены за счет увеличения перекрытия поверхностей, например, при конусном соединении труб и т. д. Пайку деталей из Be со сталью выполняют при нагреве до 975° С, в качестве припоя используют Ti. Бериллий с титаном образует эвтектику, которая хорошо смачивает поверхности и затекает в зазоры. Сплавы Ag—Cu, обычно используемые для пайки, обладали меньшей жидкотекучестью и хуже смачивали поверхности, чем Be—Ti-сплав.

Основное требование при пайке пористых материалов заключается в том, чтобы свести к минимуму заполнение пор припоем. Один из способов пайки пористых материалов с непористыми заключается в том, что на пористую поверхность наносят слой Ni толщиной 0,125 мм. Пайку выполняют в печи припоем системы Ni—Fe—Cr—B—Si при 982° С. При взаимодействии припоя с Ni-покрытием в процессе контактного плавления образуется сплав с более низкой температурой плавления, хорошо смачивающий паяемые поверхности.

Контактно-реактивную пайку используют также и для соединения жаропрочных сплавов и тугоплавких металлов: Nb, Mo, Ta и W. Этот способ позволяет соединять тугоплавкие материалы при низких температурах и получать швы с высокой температурой вторичного расплавления. Так, при пайке деталей из W припоем Pt—W, имеющим температуру плавления 860° С, за счет растворения W в припое при кристаллизации образуются стойкие бориды W и температура плавления шва резко возрастает. При соединении Nb и его сплавов используют припой Ti—30V—4Be,

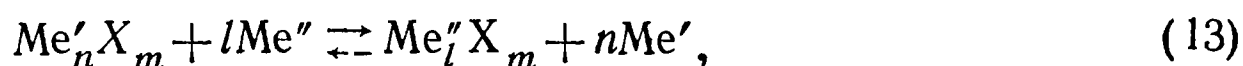
имеющий температуру плавления 1288—1315° С. Но наиболее широкое применение для пайки тугоплавких металлов нашли способы контактно-реактивной пайки с последующей диффузионной пайкой или диффузионным отжигом, которая обеспечивает увеличение температуры распая за счет диффузии в основной материал легкоплавких элементов.

Контактно-реактивной пайкой возможно соединять широкий спектр материалов. Факторами, регулирующими процесс, являются температура, время, давление, состав покрытий, их толщина. Одним из основных параметров, позволяющих получать соединения с высокими механическими свойствами, является ширина шва. Ширину шва регулируют в основном за счет выбора оптимального давления, позволяющего помимо обеспечения тесного контакта между деталями выдавливать излишки припоя. Другим способом снижения скорости контактного плавления является использование промежуточной прослойки между паяемыми металлами, в состав которой входит 70—97% неактивного металла, не принимающего участия в образовании жидкой прослойки.

РЕАКТИВНО-ФЛЮСОВАЯ ПАЙКА

Реактивно-флюсовой пайкой называется метод пайки, при котором припой (или покрытие на металлах, облегчающее смачивание) образуется в результате химической реакции между паяемым металлом и компонентами, входящими в состав флюса.

Химические реакции взаимодействия паяемого металла и флюсов сложны и многообразны. Одной из основных реакций является реакция восстановления металла из флюса, протекающая по схеме



где $\text{Me}'_n\text{X}_m$ — галогенид металла во флюсе; Me'' — паяемый металл; $\text{Me}''_l\text{X}_m$ — образуемое соединение, обычно летучее; Me' — восстановленный металл из флюса.

Другой реакцией является разложение солей и соединений ($\text{Me}'_n\text{X}_m$), входящих в состав флюса:



Процессами, играющими важную роль в формировании паяного соединения при реактивно-флюсовой пайке, являются также восстановление окисной пленки паяемых металлов и окислов, входящих в состав флюса, водородом, который образуется при разложении гидридов, а также растворение окисной пленки фторидами. Во флюсы вводят ингибиторы коррозии, катализаторы химических реакций и вещества — растворители для удаления продуктов реакции.

Металл, появившийся в свободном виде в результате реакций (13), (14) и реакций восстановления окислов, смачивает паяемый металл и служит или припоем или, высаживаясь в виде покрытия на паяемых металлах, облегчает процесс пайки при помощи дополнительно вводимого припоя.

Термодинамическая вероятность протекания реакции восстановления металла из флюса тем выше, чем больше изменение свободной энергии, сопровождающее реакцию (13), т. е. чем больше разница изобарно-изотермических потенциалов соединений $\Delta Z_{\text{Me}''_l\text{X}_m} - \Delta Z_{\text{Me}'_n\text{X}_m}$, или иначе, чем больше величина $(\Delta Z_{\text{Me}''_l\text{X}_m})$. Теплота образования и приближенные значения изменения свободной энергии образования (распада) хлоридов некоторых металлов приведены в табл. 2.

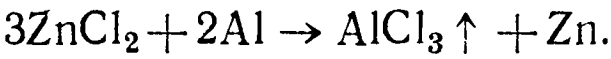
Из табл. 2 следует, что при пайке Ti, Al и Mg наиболее легко процесс реактивно-флюсовой пайки будет происходить при использовании хлоридов Ag, Cu, Ni, Fe, Sn, Zn и т. д.

Наиболее широко реактивно-флюсовый процесс используется при пайке Al, имеющего стойкие окисные пленки, которые затрудняют использование обычных способов пайки. Основу флюсов при пайке составляют хлориды Zn, Sn, Cd или других легкоплавких металлов, которые хорошо смачивают окисную пленку на алюминии.

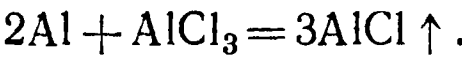
2. Теплота образования и приближенные значения изменения свободной энергии образования (распада) хлоридов некоторых металлов (ккал/моль)

Хлориды	Теплота образования Н ₂₉₈	Изменение свободной энергии	Хлориды	Теплота образования Н ₂₉₈	Изменение свободной энергии
TiCl ₄	192,5	176,6	FeCl ₃	96,0	81,9
AlCl ₃	166,8	152,3	CdCl ₂	93,0	82,0
MgCl ₂	153,2	141,4	PdCl ₂	85,8	76,1
TiCl ₂	120,6	109,8	SnCl ₂	83,6	74,2
KCl	104,2	97,7	FeCl ₂	81,9	72,6
ZnCl ₂	99,4	88,2	NiCl ₂	73,0	61,9
NaCl	98,3	91,9	CuCl ₂	53,4	43,0
ZiCl	97,7	91,8	AgCl ₂	30,4	26,2

Взаимодействие хлорида Zn с Al происходит по следующей схеме:



Возможно также образование субхлорида Al по реакции



Хлориды, проникая под окисную пленку Al, взаимодействуют с ним. Образование летучих продуктов реакции (AlCl₃, AlCl), обладающих большой упругостью пара, способствует диспергированию и отделению окисной пленки.

Восстановленный при пайке Zn вступает во взаимодействие с Al, образуя сплавы Al—Zn. Исследование взаимодействия Al с флюсом 34А (см. гл. 4) показало, что насыщение поверхности Al приводит к интенсивному развитию химической эрозии паяемого материала и ухудшению его пластичности. В связи с этим был предложен флюс Ф5, предотвращающий эрозию Al [11]. Другим способом уменьшения эрозии является сокращение до 1% содержания ZnCl₂ и CdCl₂ в составе флюса. Для пайки Al и Mg разработаны флюсы сложного состава, содержащие несколько флюсующих солей преимущественно галоидов и растворителей. Флюсы этого типа не требуют дополнительного введения припоя. В качестве ингибиторов коррозии во флюс вводят галогены ряда металлов.

После нанесения флюса окунанием радиатор нагревают в печи до 260—343° С. При взаимодействии флюса с паяемым металлом происходит его разложение с выделением тепла и образование припоя на основе Al—Zn. Полученные паяные швы обладают высокой коррозионной стойкостью.

К другой группе флюсов сложного состава относятся флюсы, пайку которыми ведут с применением припоя. Так, для пайки Al и его сплавов рекомендуется серия флюсов, в которые входят SnCl₂, ZnCl₂, обезвоженный растворитель, сгорающий в пламени при нагреве, а также фтористые соединения NH₄F и др.

Флюсы подобного типа наносятся на паяемые поверхности в виде пасты или суспензии. Поверхность нагревают до 288—343° С, флюс смачивает поверхность.

В состав флюсов, например при пайке Fe, вводят окислы (Cu, Ag, Ni, Mg), которые при восстановлении образуют припой. В качестве восстановителей применяют гидриды Ca, Mg, Zn, Li, Ba, Al, Mn, Na. Окислы и гидриды подбирают таким образом, что уже при сравнительно низкой температуре они вступают в реакцию восстановления, в результате которой образуются чистые металлы, свободный водород и окисел металла, ранее содержавшегося в форме гидроида. В результате экзотермических реакций температура смеси резко повышается, улучшая смачивание. Интересным примером является использование подобных флюсов для низкотемпературной пайки чугуна. В этом случае применяются флюсы, содержащие окислы (порядка 5%) тяжелых металлов: Pb, Fe, Mn, W, U. В результате взаимодействия окислов с зернами или хлопьями графита происходит его удаление с поверхности за счет образования СО₂ и СО, что приводит к улучшению смачивания припоем. Хлориды и бромиды Ga, Pb, W, Fe (порядка 15%), а также соединения NH₄Cl совместно с (NH₄)HF₂ (58%) снижают точку плавления флюса. При нагреве фториды

разлагаются с образованием растворимых соединений металлов, взаимодействующих, в свою очередь, с окислами на поверхности паемого металла. Окисел CuO (22%) вводится для того, чтобы образовать на поверхности Fe слой Cu и тем самым улучшить смачивание. Пайка производится по обычной технологии всеми низкотемпературными припоями.

ДИФФУЗИОННАЯ ПАЙКА

Диффузионной пайкой называют вид пайки, при котором затвердевание шва происходит в процессе изотермической кристаллизации. Следует отличать диффузионную пайку от диффузионной термообработки паяных соединения с целью увеличения температуры распайки за счет диффузии элементов из шва в основной металл.

Процесс диффузионной пайки можно представить состоящим из двух стадий: в течение первой преобладает растворение твердого металла в жидком, во второй происходит собственно процесс изотермической кристаллизации, лимитируемый диффузией атомов в твердую фазу. Вопросы кинетики диффузионной пайки рассмотрены в работах [5, 6] и др. В этих работах показано, что имеет место параболический закон роста толщины слоя закристаллизовавшегося металла

$$x(t) = b\sqrt{2Dt}, \quad (15)$$

где $x(t)$ — зависящая от времени толщина закристаллизовавшегося слоя; D — коэффициент диффузии в твердой фазе; b — коэффициент, зависящий от концентрационных условий на межфазной границе, его определяют из уравнения

$$\frac{1 - C_2^T}{C_2^T - C_1^J} = b \exp(b^2) (1 + \operatorname{erfc} b) \sqrt{\pi}. \quad (16)$$

Зависимость коэффициента b от $F(C) = \frac{1 - C_2^T}{C_2^T - C_1^J}$ может быть определена из номограммы рис. 2 и рис. 3, а.

Особенность диффузионной пайки как самостоятельного метода заключается в том, что изотермическая кристаллизация обеспечивает получение наиболее равновесной структуры шва. Прочность и пластичность соединений увеличиваются за счет отсутствия в шве малопластичной литой структуры и продуктов неравновесной кристаллизации. Диффузионную пайку в некоторых случаях можно проводить так, что образование интерметаллидов исключается. Для этого температуру пайки выбирают выше температуры плавления химического соединения. В тех случаях, когда это невозможно, вследствие высокой температуры плавления интерметаллидов в шве образуются и растут интерметаллидные слои, тормозящие диффузию между твердой и жидкой фазами. Если процесс пайки ведется при температуре несколько ниже температуры образования интерметаллида при достаточно малой толщине шва и соответственно слоя интерметаллида, последний вследствие неравновесного состояния прослойки может раствориться за счет диффузии в основной металл.

Как следует из уравнений (15) и (16), скорость протекания процесса диффузионной пайки зависит от коэффициента диффузии и коэффициента b , характеризуемого концентрационными условиями на межфазной границе. С увеличением температуры пайки и коэффициента диффузии в твердой фазе уменьшается время, необходимое для протекания процесса. Коэффициент b возрастает при снижении значений C_2^T и увеличении C_1^J , т. е. при увеличении растворимости твердой фазы в расплаве и атомов расплава в твердой фазе (например, до значений C_1' и C_2' , рис. 3).

Одним из важнейших преимуществ диффузионной пайки является возможность получения соединений из тугоплавких металлов с высокой температурой распайки при температуре пайки, лежащей ниже температуры плавления паемых материалов.

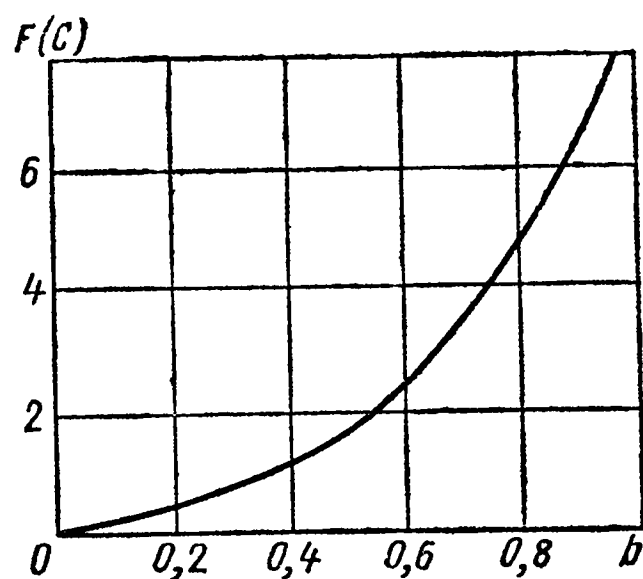


Рис. 2. Номограмма зависимости коэффициента b от $F(C)$

При диффузионной пайке происходит также изменение химического состава припоя в результате испарения легколетучих компонентов, снижающих температуру пайки. Так, предложено производить диффузионную пайку аустенитных сталей припоями Ni—In (61% Ni и 39% In) или припоями системы Ni—Cr—In—Ge. В припоях этого типа испаряющимся элементом является In [24].

Метод диффузионной пайки находит широкое применение при пайке алюминия, магния, сталей, активных и тугоплавких металлов. Так, для пайки компактного и пористого Al разработан способ диффузионной пайки, исключающий применение флюса и глубокое проникновение припоя в поры основного металла. На паяемые поверхности наносят смесь (Al с 2% Cu) порошков, образующую эвтектику Al—Cu с температурой плавления 548°C . Пайку производят при 625°C в среде H_2 . Эвтектика в процессе пайки растворяется в основном металле и граница раздела паяемых металлов исчезает.

При пайке Mg и его сплавов в качестве припоя для пайки используется Ag в виде фольги или Ag-покрытие, которое наносилось на поверхность при помощи

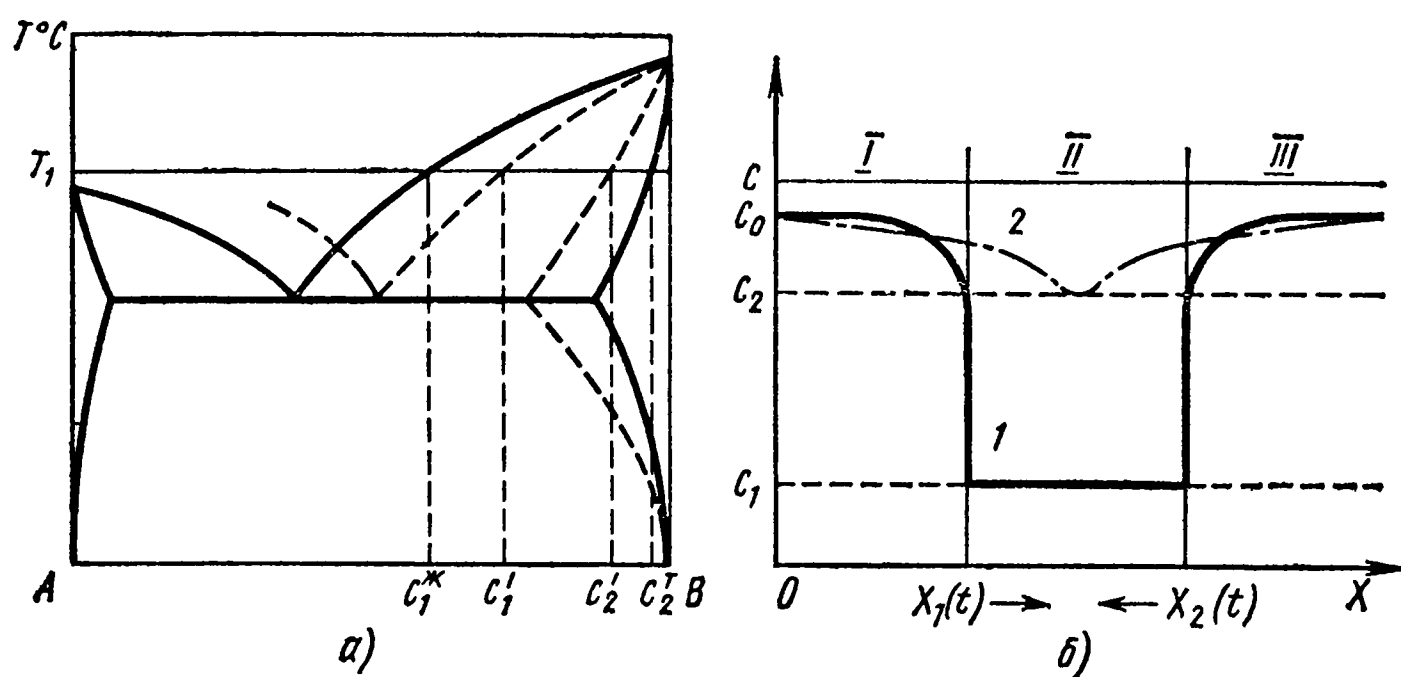


Рис. 3. Схема диффузионной пайки:

а — диаграмма состояния эвтектического типа; б — распределение концентраций элемента В в шве; 1 — к моменту насыщения; 2 — после завершения изотермической кристаллизации

ионного напыления [1, 12]. Температура пайки $520\text{—}570^\circ\text{C}$, среда Ag. Применение ионного способа нанесения покрытия, способствующего удалению окисной пленки с поверхности Mg-сплава, на порядок снижает время диффузионной пайки. По-видимому, при ионном способе нанесения покрытия за счет дефектности поверхностного слоя диффузионные процессы существенно ускоряются. Для сокращения времени пребывания Mg при температуре пайки эффективно вести процесс с термоциклированием — циклический нагрев до температуры пайки с последующим охлаждением на 100°C ниже солидуса припоя. Термоциклирование за счет активизации диффузионных процессов позволяет снижать общее время пайки в 1,5 раза, а время выдержки при температуре пайки в 6 раз.

Исследования структуры и механических свойств соединений Ti, паянных Ag и с использованием Cu и Ni-покрытий, образующих эвтектику с Ti, показали, что при диффузионной пайке прочность на срез при использовании Ni и Cu в 3—4 раза выше, чем при использовании Ag. В процессе диффузионной пайки в шве образуются твердые растворы на основе Ti. Ширина зон, структура и их свойства зависят от режима пайки [5]. При использовании Ni-покрытия (15—20 мкм) на ОТ4 после пайки при 1000°C в течение 30 мин содержание Ni в шве составляет 9,38%, а в диффузионной зоне рядом со швом не более 3,5% (атомн.). При увеличении выдержки до 60 мин концентрация Ni по сечению шва не превышает 1,5% (атомн.). В случае использования Cu-покрытия (15 мкм) при 1000°C после 40 мин выдержки при пайке прослойка эвтектики исчезает. Шов состоит из твердого раствора Cu в $\alpha\text{—Ti}$ и включений Ti_2Cu . Предел прочности стыковых соединений достигает $40\text{—}60\text{ кгс/мм}^2$, температура распайки 1290°C [4].

3. Диффузионная пайка тугоплавких металлов

Основной материал, состав (%)	Припой, состав (%)	Режим пайки		Температура эксплуатации, °С и прочность	Температура распайки, °С
		Температура, °С	Время, мин		
Pt	Au	1350	30	1300	—
Pt до 20 Rh	Au	1400		1700	—
Pt до 10 Rh до 20 Pd	Au	1600	12	1700	—
Pt до 30 Ir Th и Al до 1	75Au — 25Pd	1440	30	—	—
	40Au — 60Pd	1600		1450	
	65Au — 25Pd	1450	10	1350 ($\tau_{ср} = 2,5 \text{ кгс/мм}^2$, 200 ч)	
	40Au — 60Pd	1450	30	1350 ($\tau_{ср} = 3,1 \text{ кгс/мм}^2$, 250 ч)	
Ta — 10W	Ti	1760	10	1928 ($\sigma_B = 1,6 \text{ кгс/мм}^2$)	2090
Nb	Ti, 33Cr	1450—1480	—	1600 ($\sigma_B = 0,87 \text{ кгс/мм}^2$)	—
Mo (TZM) 40—55 Ti, 0,6—1,2 Zr, 0,1 Fe Mo — остальное	Ti, 25 Cr, 3 Be	—	—	—	1593
	Nb или Mo-порошок 9,15Ti, 8,5Si	1343, диффузионная обработка 1204	15 3 *	1730 ($\sigma_B = 28 \times 10^{-4} \text{ кгс/мм}^2$), 1620 ($\sigma_B = 42 \times 10^{-4} \text{ кгс/мм}^2$)	1650
Mo и W (W — 2ThO ₂)	Покрытие Ni (2мкм) на Mo и W	1525, отжиг 1200 в водороде	8 * 500 *	— 2000 10 *	—

* Время, ч.

Исследования кинетики охрупчивания при пайке Ti [8, 20] показали, что основной причиной, ухудшающей пластические характеристики соединения, является взаимодействие Ti с припоем и примесями защитной атмосферы. Изменение пластичности соединения при наличии Cu—Ni-покрытия протекает в три стадии. Снижение пластичности на первой стадии обусловлено ростом хрупких диффузионных слоев (эвтектики и соединения Ti₃—Cu) и продолжается до момента полного исчезновения жидкой фазы. В течение второй стадии возрастание пластичности связано со снижением содержания Cu в диффузионных зонах и уменьшением количества интерметаллидов. На третьей стадии снижение пластичности в основном обусловлено

влиянием примесей защитной среды. Введение в Cu-покрытие до 20% Ni за счет соответствующего уменьшения содержания Cu приводит к снижению количества интерметаллидной фазы Ti_3Cu в диффузионной зоне и к возрастанию прочности и пластичности. Никель входит в твердый раствор интерметаллида Ti_3Cu и $\alpha-Ti$. Увеличение содержания Ni свыше 20% приводит к образованию в диффузионной зоне метастабильной α' -фазы Ti [8, 20].

Диффузионная пайка бериллиевой бронзы (содержащей 1,8—2,5% Be) припоем 63% Ag, 27% Cu и 10% Zn позволяет за счет однородной структуры обеспечивать предел прочности соединений, равный ~ 75 кгс/мм², по сравнению с 40 кгс/мм² при обычной капиллярной пайке [23]. Однофазная структура шва с высокой температурой распайки (1290° С) может быть получена при пайке Ni припоями, в состав которых входят элементы с большой растворимостью в основном металле Ni — 11% Si и Ni — 11% Р и Cu. Режим пайки 1200° С, 20 мин. Увеличение температуры распайки и прочности происходит за счет диффузии Si, Р и Cu в основной металл и растворения легирующих элементов основного металла в припое, т. е. типичного для диффузионной пайки способа.

Увеличение температуры распайки за счет процессов массопереноса на межфазной границе является решающим в выборе диффузионной пайки как способа соединения тугоплавких материалов. В качестве примера в табл. 3 приведены системы припоев, типичные режим пайки и температура распайки или эксплуатации соединений при пайке тугоплавких металлов и сплавов. Для предотвращения пористости, возникающей в результате эффекта Киркендалла, зазоры стремятся выбирать минимальными.

НЕКАПИЛЛЯРНАЯ ПАЙКА

При некапиллярной пайке разделка кромок соединяемых деталей аналогична подготовке, применяемой при сварке. Этот вид пайки используют для изделий из чугуна и выполняют припоями из латуни с добавками Si, Mn, Р и Al. При соединении изделий толщиной более 4 мм рекомендуется V-образная разделка кромок под углом 70—90°, при толщине 20 мм и более X-образная разделка, чугун желательно предварительно подогреть до 250° С.

При соединении труб диаметром более 50 мм из меди применяют ацетиленокислородное пламя с вдуванием через сопло легкоиспаряющегося флюса с использованием серебряного припоя.

Применение электродугового и газопламенного нагрева является наиболее распространенным способом получения паяно-сварных соединений сплавов на основе Al, Cu, Fe, Be, тугоплавких металлов и др.

Использование дуги в качестве независимого теплового источника также открывает широкие перспективы и для низкотемпературной пайки материалов.

Разновидностью некапиллярной пайки, применяемой при соединении разнородных металлов, является получение соединений за счет расплавления более легкоплавкого металла и смачивания им поверхности более тугоплавкого материала. Необходимая температура подогрева поверхности тугоплавкого металла достигается за счет регулирования величины смещения электрода от оси шва на более тугоплавкий материал.

Разработан комбинированный способ получения соединений, заключающийся в сварке и последующей пайке. Сущность такого способа соединения углеродосодержащих материалов между собой или с металлами заключается в следующем. При V-образной разделке кромок в корень шва укладывают некоторое количество Ti, который сваривают с материалом соединяемых деталей для образования первого слоя. Заполнение остальной части разделки происходит при помощи припоя (% по массе): Fe 30—70; Ni 20—50; Ti или Zr 5—20; Si 0—10; В 0—5, температура плавления 1400—1600° С. Припой готовят в виде пасты из смеси металлического порошка и стирола. Пайку выполняют независимой дугой в среде инертных газов.

Паяные соединения с односторонней сваркой деталей позволяют улучшить внешний вид, механические свойства, герметичность, а также дают возможность наносить гальванические и химические защитные покрытия.

Подобный способ используют для соединения деталей из алюминиевых сплавов [8]. Для соединения узлов из сплава А7 и АМц после предварительной пайки припоем 34А с флюсом 34А выполняют аргоно-дуговую сварку паяного шва.

ПАЙКА КОМПОЗИЦИОННЫМИ ПРИПОЯМИ

Для получения соединений без изменения физико-химических свойств материалов необходимо, чтобы процесс соединения происходил при температурах ниже температуры изменения свойств материала (оптимально ниже температуры рекристаллизации), а зона шва должна по свойствам максимально приближаться к свойствам паяемых материалов.

Одним из способов, позволяющих получить такие соединения, является непиллярная пайка с использованием композиционных припоев [13].

Композиционный припой состоит из матрицы — более легкоплавкого материала, обеспечивающего смачивание, и наполнителя — более тугоплавкого материала, ответственного за основные физико-химические, в частности, прочностные свойства соединения. Наполнитель может быть использован в виде порошка, дисперсных частиц, волокон, нитей и т. д.

Отличительная особенность композитных материалов состоит в том, что совместная работа разнородных материалов, входящих в его состав, дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого отличаются от свойств каждого из его составляющих. Наибольшее упрочнение характерно для сверхтвердых сплавов при упрочнении их тонкодисперсными образованиями. Эффективность упрочнения дисперсными частицами зависит от концентрации частиц, их размера, распределения и определяется в основном способностью частиц тормозить движение дислокаций.

Более низкий коэффициент упрочнения 3—30 характерен для дисперсных систем (с d_p до 0,1 мкм). В керметах, состоящих из мелких керамических частиц ($d_p \approx 0,1 \div 10$ мкм) в металлической матрице, F изменяется от 1 до 3. Величину коэффициента F можно существенно повысить при использовании частиц вытянутой формы (усы, волокна и т. д.) [16]. Теоретический и экспериментальный анализ показывает, что волокна являются наиболее эффективными упрочнителями. Эффективность упрочнения определяется соотношением длины к диаметру волокна, средней прочностью и объемным содержанием волокон.

В случае армирования волокнами имеет место наибольшая прочность и стабильность структуры при повышенных температурах по сравнению с металлами, упрочненными частицами, поскольку для волокна отношение площади поверхности к объему и, следовательно, поверхностная свободная энергия меньше. Сплавы, упрочненные мелкодисперсными частицами, наименее устойчивы вследствие склонности к перестарению.

Для создания высокопрочной композиции необходимо выполнение ряда условий. Наполнитель, в частности волоконный, должен иметь высокие значения модулей упругости, прочности при повышенных температурах, обладать низкой склонностью к ползучести и т. д. Отношение модуля упругости к плотности, являющееся одним из основных критериев эффективности композиции, для пайки, по-видимому, вследствие малых размеров шва не является существенным. Наполнитель должен быть также химически инертным по отношению к матрице при повышенных температурах и ориентирован по отношению к нагрузке.

Преимущество волокон как упрочнителя заключается в ином механизме упрочнения по сравнению с дисперсными частицами, и эффективность упрочнения в основном будет зависеть от свойств волокон, а матрица действует как среда, передающая напряжения. Таким образом, при создании композиционных припоев в качестве матрицы в этом случае может быть использован широкий спектр металлов и основные требования к матрице будут сводиться к обеспечению качественного смачивания наполнителя и паяемых материалов. Матрица должна иметь также более низкий

модуль упругости и температуру плавления, превышающую температуру работы изделия.

В простейшем случае композиционный припой изготавливают и используют в виде фольги. Обычно предварительно спеченный каркас из наполнителя в виде порошков, сеток, волокон (диаметром 0,013—0,25 мм) и т. д. пропитывают расплавом и прокатывают до требуемой толщины. Волокнистую массу для получения требуемой пористости уплотняют как до, так и после спекания. Регулируя режим пропитки, можно в процессе жидкофазного спекания дополнительно регулировать структуру припоя. В качестве наполнителей наиболее широко используют порошки Fe, Ni, Co, окислы и гидриды Ti, Zr, стальные волокна и т. д. В качестве расплава (матрицы) применяют сплавы систем на основе Ga, Ag—Cu; Ag—Pb; Pb—Sn и т. д. [13, 19, 21, 22, 23, 25]. Использование такого материала в виде ленты или листов перспективно при соединении с большими зазорами и особенно при восстановительном ремонте. При наложении ленты на сквозное отверстие и нагреве выше температуры плавления матрицы сетка из волокна удерживает припой.

Вторая разновидность композиционной пайки состоит в том, что сетку, волокна, порошок и т. д. из тугоплавких материалов помещают в зазор с последующей операцией частичного спекания или без нее. Более легкоплавкий материал (матрицу) укладывают около зазора. Этот способ перспективен при пайке с большими зазорами (1 мм и более), а также при запаивании небольших отверстий. В качестве порошков применяют W, Fe, Co, Ag и их смеси.

Композиционный припой может состоять из смеси порошков с различной температурой плавления. При использовании паст в качестве связующих используют как металлические расплавы, так и неметаллические, в частности, флюсующие вещества. Использование смеси тугоплавких и легкоплавких порошков позволяет выполнять соединение по большим площадям в широком диапазоне зазоров.

Порошки могут быть подобраны так, что они образуют расплав в процессе контактного плавления между отдельными частицами различных материалов, составляющих припой, например, смеси порошков Ag с Cu; Si с Al; Ti с Ni, Cu и других с различного типа тугоплавкими наполнителями. В отличие от ранее рассмотренных систем использованием покрытий и дозированного количества частиц, вступающих в реакцию, можно с высокой точностью регулировать объем жидкой фазы и, следовательно, улучшить качество и надежность получаемых соединений. Широкие перспективы открываются также при использовании этого типа припоев для соединения пористых материалов.

Образование композиционного материала в зазоре может происходить в процессе диспергирования соединяемых металлов под действием расплава. Исследования показали, что при взаимодействии материалов с расплавами для систем, обладающих исчезающе малой взаимной растворимостью, наблюдается эффект квазисамопроизвольного диспергирования основного материала [14].

К композиционным относят широкий класс припоев, механические свойства которых могут быть улучшены термообработкой за счет выделения дисперсных и другого типа фаз. Регулируя дисперсность и распределение этих фаз, можно получить соединение с заданными физико-химическими свойствами. Напряжение сдвига по Оровану τ , необходимое для проталкивания дислокаций через блокирующие включения, следующим образом связано с их дисперсностью (d_p) и количеством (β):

$$\tau = \frac{\sigma_B}{d_p} \sqrt[3]{\beta}, \quad A \approx 0,5,$$

где σ_B — предел прочности матрицы.

Таким образом, наибольшее влияние на упрочнение оказывает размер дисперсных частиц, когерентно связанных с матрицей, и наибольшее упрочнение будет иметь место в том случае, когда атомные скопления будут находиться в стадии предвыделения. В последнем случае их размеры минимальны, а количество и области искажения в матрице максимально велики.

Изложенное не исчерпывает всех возможных случаев получения композиционных материалов и применения их в качестве припоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. С., Маркова И. Ю., Петрунин И. Е. О диффузионной пайке магниевых сплавов. — В кн.: Пайка материалов в машиностроении. Ч. 2. Рига, Лат. ИНТП, 1968, с. 67—71.
2. Арутюнов Ю. С., Гржимальский Л. Л., Петрунин И. Е. Исследование зависимости высоты поднятия припоя от величины зазора при пайке. — «Сварочное производство», 1970, № 2, с. 31—33.
3. Вершок Б. А., Новосадов В. С. Расчет нестационарной кинетики и процесса контактного плавления. — «Физика и химия обработки материалов», № 2, 1974, с. 61—65.
4. Гришин В. Л., Лашко С. В. О взаимодействии припоев с титаном в процессе диффузионной пайки. — «Автоматическая сварка», 1966, № 6, с. 41—44.
5. Долгов Ю. С., Сидохин Ю. Ф., Сидохин А. Ф. Кинетика диффузионной пайки титана. — «Сварочное производство», 1968, № 12, с. 11—12.
6. Долгов Ю. С., Сидохин Ю. Ф. К теории диффузионной пайки металлов. — «Физика и химия обработки материалов», 1969, № 5, с. 128—132.
7. Каневский Я. М., Дубовик А. С. Повышение надежности паяных соединений и его сплавов аргоно-дуговой сваркой. — В кн.: Пайка материалов в машиностроении. Ч. 2. Рига, Лат. ИНТП, 1968, с. 42—50.
8. Куфайкин А. Я., Черницын А. И. Исследование взаимодействия титана с медно-никелевым покрытием, применяемым в качестве припоя при диффузионной пайке — В кн.: Технология и оборудование высокотемпературной пайки. М., МДНТП, 1973, с. 12—16.
9. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. М., «Машиностроение», 1967, 366 с.
10. Лашко С. В., Никитинский А. М., Гундырев Г. Н. Пористость в паяных соединениях латуни и способы ее уменьшения. — «Сварочное производство», 1970, № 1, с. 46—48.
11. Лашко Н. Ф., Лашко С. В., Никитинский А. М. Флюсовая пайка в печах алюминиевых сплавов. — «Сварочное производство», 1965, № 11, с. 18—20.
12. Маркова И. Ю., Алексеев А. С. Диффузионная контактно-реакционная пайка магния серебром — В кн.: Пайка в промышленности. М., МДНТИП, 1970, № 1, с. 41—46.
13. Новосадов В. С. Перспективы и возможности использования композитного материала для образования соединения — В кн. Научные проблемы соединения материалов галлиевыми пастами. М., НТО Машпром, 1972, с. 16—19.
14. Петрунин И. Е., Гржимальский Л. Л. Взаимодействие вольфрама с медью, марганцем, серебром и оловом. — «Металловедение и термическая обработка металлов», 1969, № 1, с. 21—24.
15. Савицкая Л. К. Расчет скорости контактного плавления эвтектических систем. — «Изв. вузов, Физика», 1962, № 6, с. 132—138.
16. Саттон У., Чорне Дж. Перспективы металлов, армированных волокнами окислов. — В кн.: Волокнистые композиционные материалы. М., «Мир», 1967, с. 207—260.
17. Суслов А. А., Ермолов В. А., Лоцманов С. Н. Пайка алюминиевых сплавов в парах магния. — В кн.: Пайка в промышленности. М., МДНТП, 1970, № 1, с. 87—94.
18. Темкин Д. Е. Кинетика контактного плавления в стационарном режиме — «Изв. АН СССР, Металлы», 1967, № 3, с. 220—225.
19. Тихомирова О. И. Теоретические проблемы разработки галлиевых паст. — В кн.: Научные проблемы соединения материалов галлиевыми пастами. М., НТО Машпром, 1972, с. 6—10.
20. Черницын А. И., Куфайкин А. Я., Расторгуев Л. Н. Структура и фазовый состав переходной зоны, образующейся при диффузионной пайке титана. В — кн.: Технология и оборудование высокотемпературной пайки. М., МДНТП, 1973, с. 17—22.
21. Coxe C. D., Setapen A. M. The strength of silver alloy brazed joints «Welding Journal», 1949, 28, p. 264.
22. Haynes C. W. Technology from the Apollo diffusion bonding makes complex designs possible «MetallProgress» 1969, 95, N 3, p. 83—86.
23. Hoffman J. A., Baxter G. R., Bertossa B. R. Diffusion bonding beryllium copper bor ultra high strength joints. — «Welding Journal», 1962, 41, N 4, p. 1605.
24. Lehrer W., Schwartzbart H. Volatilization phenomena in hightemperature brazing filler alloys. — «Welding Journal», 1960, 39, N 10, p. 449 S.
25. Schwartzbart H. Metal fibre reinforced soldering tape — «Brit Welding Journal», 1965, 12, N 11, p. 538—542.

Качество паяного соединения наряду с другими факторами зависит от используемого припоя, к которому предъявляют следующие требования:

температура плавления припоя должна быть ниже температуры плавления соединяемых металлов (материалов);

припой должен обладать хорошей жидкотекучестью, смачивать поверхности соединяемых металлов (материалов), растекаться по ним, проникать в узкие зазоры;

припой должен за счет растворно-диффузионных процессов образовывать с соединяемыми металлами сплав, обеспечивающий прочную связь в зоне спаев;

коррозионная стойкость припоя, паяных швов и основного металла должна быть примерно одинакова во избежание образования микрогальванических пар (электрокоррозии);

коэффициенты линейного расширения припоя и соединяемых металлов должны быть максимально близкими во избежание образования остаточных напряжений и трещин в паяном соединении;

припой не должен в значительной степени снижать прочность (статическую и вибрационную) и пластичность соединяемых металлов, находясь как в жидком, так и в твердом состоянии, а также способствовать хрупкому разрушению паяемых металлов.

К припоям помимо общих требований может предъявляться ряд специфических требований в зависимости от его использования, например, требования по электропроводности, теплопроводности, коррозионной стойкости в специальных средах, деформации в горячем и холодном состоянии и т. д.

Существующие припои классифицируют:

по химическому составу (медные, серебряные, золотые, палладиевые, платиновые, никелевые, железные, марганцевые, магниевые, оловяно-свинцовые, свинцовые, индиевые, цинковые, кадмиевые, висмутовые, галлиевые, титановые);

по технологическим свойствам на самофлюсующие, которые обладают лучшими технологическими свойствами за счет частичного удаления припоем окислов с паяемой поверхности, и композитные припои, состоящие из смеси тугоплавких и легкоплавких порошков, которые позволяют производить пайку узлов с большими зазорами;

по температуре плавления; к низкотемпературным припоям относят припой с температурой плавления ниже 450°C и к высокотемпературным — выше 450°C . Низкотемпературные припои выплавляют на основе олова, висмута, кадмия, свинца, цинка, индия. Высокотемпературные припои в основе имеют медь, серебро, никель, кобальт, железо, алюминий и др.;

по форме; пластичные припои изготавливают в виде полос фольги, проволоки путем прокатки, волочения, прессования, хрупкие — в виде литых прутков, отливок, порошка, паст. Применяют также припои в виде стружки, сетки, колец, брикетов [19].

Для удобства использования оловяно-свинцовых припоев и повышения производительности труда последние иногда изготавливают в виде трубок, заполненных флюсом, или пастой, состоящей из порошка и канифоли.

Высокотемпературные хрупкие припои изготавливают в виде порошка, паст.

МЕДНЫЕ ПРИПОИ

Медь (марок М0, М1, М2) и сплавы на ее основе нашли широкое применение в качестве припосв для пайки углеродистых и многих легированных сталей, никеля и его сплавов.

Основой медных припоев обычно являются системы Cu—Zn ; Cu—Ni ; Cu—P и Cu—Mn—Ni .

Из всех припоев с низкой упругостью паров для пайки в вакууме наиболее широко применяют медь.

Медь. Недостатком меди, как припоя, является возникновение в соединениях, выполненных кислородосодержащей медью (марки М1, М2 и др.), газовых пор и кристаллизационных трещин при пайке в окислительной среде (вследствие образования эвтектики $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$).

Обладая хорошей жидкотекучестью и растекаемостью, медь легко течет в капиллярные зазоры. Эту особенность меди используют там, где необходимо получить соединения с большой протяженностью шва (более 15—20 мм).

При пайке стальных изделий в вакууме или защитных средах, где требуется большая протяженность швов, медь на паяемую поверхность наносят электролитически с толщиной слоя 5—15 мкм.

Химический состав меди различных марок приведен в табл. 1.

Медно-цинковые припои представляют собой двойные сплавы меди и цинка в различных соотношениях. Диаграмма состояния сплавов системы медь — цинк приведена на рис. 1.

Наибольший интерес представляют сплавы, содержащие менее 39% цинка и имеющие однофазную структуру (α -твердый раствор).

С увеличением содержания цинка в припое пластичность его значительно снижается. Недостатком медно-цинковых припоев является сильное испарение цинка при пайке, что приводит к повышению температуры плавления самого припоя и к образованию пористости в паяном шве.

Для снижения температуры плавления и повышения технологических свойств медно-цинковых припоев в их состав вводят в небольших количествах олово и кремний (до 1%). Добавка олова снижает температуру плавления и увеличивает жидкотекучесть припоя, кремний резко снижает выгорание цинка.

Составы и физико-механические свойства медно-цинковых припоев приведены в табл. 2 и 3.

Медно-цинковые припой-латуни марок Л63 и Л68 используют при пайке углеродистых сталей и меди.

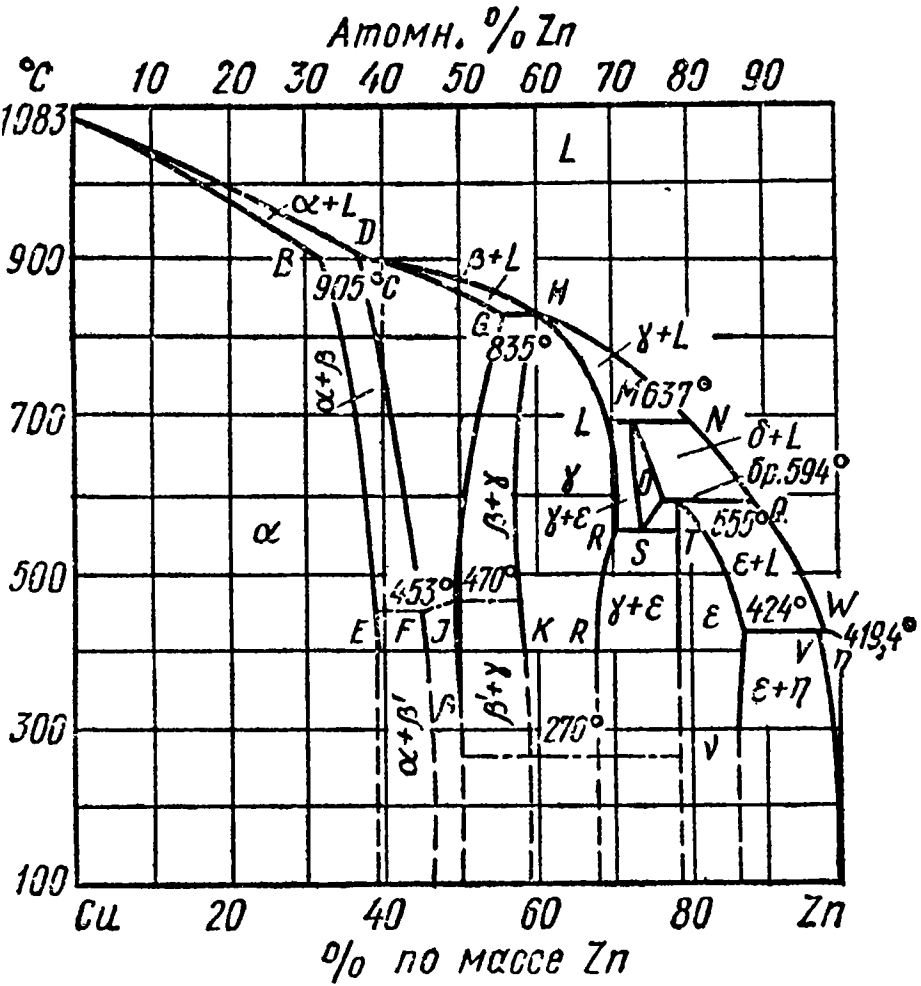


Рис. 1. Диаграмма состояния сплавов системы медь — цинк

1. Химический состав меди (по ГОСТ 859—66*)

Марка	Содержание меди, %, не менее	Содержание примесей, %, не более										Всего примесей
		Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O	Zn	
М0 *1	99,95	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004	0,02	0,004	0,05
М1 *2	99,90	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,05	0,005	0,1
М2	99,70	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2	0,01	0,05	0,01	0,07	—	0,3
М3	99,50	0,003	0,05	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,01	0,08	—	0,5
М4	99,0	0,005	0,2	0,2	0,1	—	0,3	—	0,02	0,15	—	1,0

*1 Содержит 0,002% Р и 0,003% Ag.

*2 Содержит 0,003% Ag.

2. Химический состав и температура плавления медно-цинковых припоев

Марка	Химический состав, % (Zn — остальное)							Температура, °C	
	Cu	Sn	Si	Ni	Прочие	Примеси, не более		начала плавле-ния	полного расплав-ления
						Fe	Pb		
ПМЦ36	34—38	—	—	—	—	0,1	0,5	800	825
ЛМЦ58-5	57—60	—	—	3,5—5	—	0,5—1,0	1,0	—	850
ПМЦ48	46—50	—	—	—	—	0,1	0,5	850	865
—	54	1	—	—	—	0,1	0,08	860	876
—	50	—	—	—	—	0,1	0,08	860	870
—	51,5	3,5	—	—	—	—	0,08	860	875
ЛК62-05	60,5—63,5	—	0,3—0,7	—	—	0,2	0,08	—	905
ПМЦ54	52—56	—	—	—	—	0,1	0,5	876	880
—	52—59	—	—	—	0,1 Al	0,1	0,5	871	882
—	56	1	—	1	1 Mn	1	0,08	865	888
—	60	1	—	—	—	0,1	0,08	880	890
—	60	—	—	—	—	0,1	0,08	885	890
—	59—61	—	0,2—0,5	—	1,0 Ag	0,1	0,08	893	896
—	61,4	—	—	—	6,6 Mn	0,1	0,08	—	898
—	62—68	0,2	—	3,4	1,2—2 Mn	0,1	0,08	830	900
—	57	1	—	—	—	0,1	0,08	880	900
—	59—61	—	0,1—0,4	—	—	0,1	0,08	890	900
ЛНМц-56-5-5	54—59	—	—	3,5—5,5	3,5—5,5 Mn	0,5—1,0	0,1	—	900
ЛОК 62-06-04	60,5—63,5	0,4—0,6	0,3—0,4	—	—	0,2	0,1	900	905
ЛОК 59-1-03	58—60	0,7—1,1	0,2—0,4	—	—	0,1	0,08	—	905
Л63	60,5—63,5	—	—	—	—	0,15	0,08	900	905
ГОСТ 16130—72	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	62—64	—	—	—	—	0,1	0,08	902	902
—	47	—	—	10,5	1,0 Ag	0,1	0,08	850	880
Л68	67—70	—	—	—	—	0,1	0,03	910	940
ГФК	62—71	—	3—4	4—5	5—6 Mn	5—7	0,08	935	955
—	68—71	—	—	—	—	0,1	0,3	904	960
—	57,4—60,3	—	—	5,0	—	—	—	960	980

3. Физико-механические свойства медно-цинковых припоев

Марка	γ , г/см ³	$\alpha \cdot 10^{16}$, 1/°C	$\rho \cdot 10^8$, Ом · мм ² /м	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	НВ
ПМЦ36	7,7	22	3	30	1	—
ПМЦ48	8,2	21	3,6	21	3	130
ПМЦ54	8,3	21	4	35	20	128
Л63	8,5	20	7,1	32,8	35,5	56
Л68	8,6	19	7,1	28	48	56
ЛОК62-06-04	8,5	—	—	35	—	—

4. Прочность паяных соединений из стали Ст3

Марка	σ_B	$\tau_{ср}$
	кгс/см ²	
ПМЦ48	31,3	20,9
Л63	43,0	27,3
ЛОК 62-06-04	43,0	31,6

Изделия из серого чугуна паяют МЦН 48-10; ЛК 62-05 и ЛКН 56-03-6.

Припой на медной основе, содержащие кроме цинка небольшое количество олова и кремния, обладают лучшими технологическими свойствами и обеспечивают более высокую плотность и герметичность шва. К этим припоям относят латуни марок ЛОК 62-06-04 и ЛОК 59-1-03. Однако введение олова и кремния в больших количествах охрупчивает латуни и не позволяет получать пластичные паяные соединения [1].

Прочность латуней и паяных соединений, выполненных этими припоями, повышают путем введения в их состав никеля, железа, марганца и кремния. Многокомпонентные латуни широко применяют для пайки тяжело нагруженных изделий, напри-

мер, всех видов паяного режущего инструмента (резцы, фрезы и т. д.). Паяное соединение на режущем инструменте (припайка пластин из быстрорежущей стали или твердого сплава) должно быть пластичным и обладать высокой прочностью при повышенных температурах.

Медно-цинковыми припоями паяют углеродистые стали и медь при быстрых нагревах т. в. ч. в печах, пламенем газовой горелки и в соляных ваннах с использованием в качестве флюса буры, флюсов 209, 200 и 201. Вследствие испарения цинка пайку в газообразных защитных средах и в вакууме не производят.

5. Медно-цинковые припои с никелем, марганцем и оловом

Марка	Содержание элементов, % (Zn — остальное)				Температура полного расплавления, °C
	Cu	Ni	Mn	Sn	
—	67	—	21	—	685
—	64	—	16	—	870
—	62	—	6	—	900
—	58	—	13	—	845
—	58	—	32	—	898
—	51	—	—	5	860
—	48	—	—	10	810
ЛС2П	57—60	4—5	—	—	910
КМФ	58—60	8—9	—	1	910
МЦН 48—10	46—50	9—11	—	—	935
ЛКН 56-03-6*	55,0—57,5	5,5—6,0	—	—	905

* Содержит 0,25—0,3% Si,

Прочность соединений, паяных некоторыми медно-цинковыми припоями, приведена в табл. 4.

Состав и свойства припоев, применяемых за рубежом, приведены в табл. 5—11.

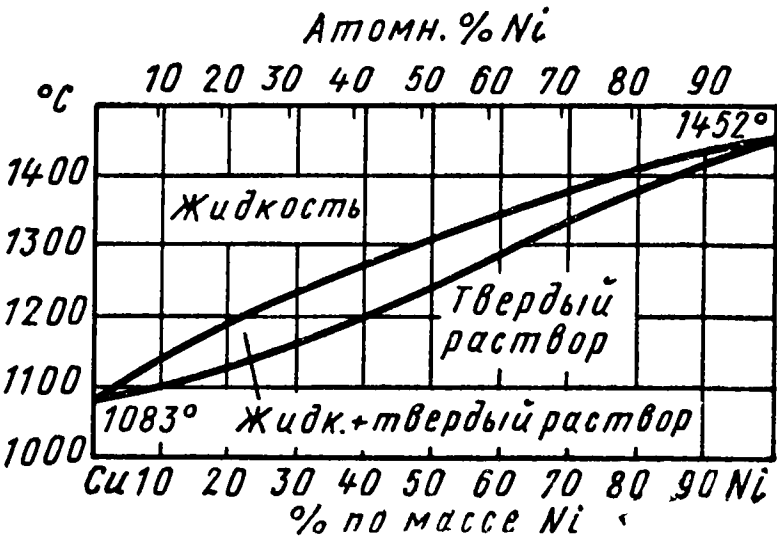


Рис. 2. Диаграмма состояния сплавов системы медь — никель

Медно-никелевые припои. Медь с никелем образует ряд твердых растворов (рис. 2) [16]. Для увеличения жаростойкости, прочности при повышенных температурах в медно-никелевые припои вводят хром, марганец, железо, кремний и алюминий (табл. 12—14).

Медно-цинковые припои для пайки нержавеющей стали типа 12Х18Н10Т из-за образования трещин в паяном соединении не применяют [6].

Изделия из нержавеющей стали следует паять припоями типа ВПр1, ВПр2 или ВПр4 в среде нейтральных газов или в вакууме (табл. 15).

6. Медно-цинковые припои, применяемые в Англии (по В. S. 1845: 1952)

Содержание элементов, % (Zn — остальное)		Примеси, % не более	Температура, °C	
Cu	Sn		начала плавления	полного расплавления
49—51	—	0,85	860	870
53—55	—	0,85	870	880
59—61	—	0,90	885	890
53—55	0,8—1,2	0,80	860	870
59—61	0,8—1,2	0,80	880	890

7. Медно-цинковые припои с никелем, применяемые в Англии (по В. S. 790: 1938)

Содержание элементов, % (Zn — остальное)		Примеси, % не более			
Cu	Ni	Fe	Mn	Pb	Прочие
60—65	9—11	0,25	0,30	0,04	0,30
60—65	11—13	0,25	0,30	0,04	0,30
60—65	14—16	0,30	0,50	0,04	0,40
60—65	17—19	0,30	0,50	—	0,20
54—56	17—19	0,30	0,50	0,04	0,20
60—65	19—21	0,30	0,50	0,025	0,20
55—60	24—26	0,30	0,75	0,025	0,20
55—60	29—31	0,30	0,75	0,025	0,20

10. Физико-механические свойства некоторых медно-цинковых припоев, применяемых в Чехословакии (ČSN)

Стандарт	Температура, °C		γ , г/см ³	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	α_K , кгс · м/см ²	λ , кал / см · с · °C	$\rho \cdot 10^8$, Ом · мм ² /м	HB
	начала плавления	полного расплавления							
423228	800	850	8,2	39	25	9	0,3	6,2	103
423227	870	900	8,2	35	—	10	0,55	7	98
423372	880	890	8,1	26	4	—	0,39	5	20
423374	770	810	7,8	—	—	—	0,50	3,3	—
423371	820	900	—	—	—	—	—	—	—

11. Медно-цинковые припои (по DIN 1733)

Марка	Содержание элементов, %			Температура, °C		Плотность, г/см ³
	Cu	Zn	Si	начала плавления	полного расплавления	
LMs85	84—86	13	0,20—0,40	1005	1025	8,7
LMs63	64—62	35		900	910	8,4
LMs60	61—59	38		890	900	8,4
LMs54	55—53	41	—	880	885	8,3
LMs 18	49—47	50	—	855	865	8,2

12. Медно-никелевые припои для пайки стальных изделий

Содержание элементов, % (Cu—остальное)						Температура пайки, °C
Ni	Cr	Mn	Fe	Si	Al	
3,0	—	2,0	—	—	5,0	1200
35—38	—	2,5—3,5	2,5—3,5	1,5	—	1120
28	—	10,0	—	2,0	—	1120
20—30	—	—	—	—	—	1250
10—14	—	4—5	12—14	1,0—1,9	—	1250
35	3,0	3,0	3,0	1,5	—	—
4,0	—	2,0	—	—	0,6	1080
3—4	—	1,5—2,0	—	0,1—0,2	0,5	1030
10	—	—	5,0	—	—	—
20	—	—	5,0	5,0	—	1000
15	—	—	—	2,0	—	—
22	6,0	—	—	—	—	1035
35—38	3,0—3,5	3,0—3,5	3,0—3,5	—	—	1200

13. Медные припои с никелем, марганцем и серебром

Марка	Содержание элементов, % (Cu—остальное)					Температура, °C	
	Mn	Ni	Si	Fe	Другие элементы	начала плавления	полного расплавления
ПМ38МЛ	36—40	4—6	1,5—2,5	—	≤ 0,2 Li ≤ 0,1 В	880	900
ВПр1	—	27—30	1,5—2,0	До 1,5	0,1—0,3 В	1080	1120
ВПр2	22—26	5—6	—	0,8—1,2	0,15—0,25 Li	960	980
ВПр4	27—30	28—30	0,8—1,2	1,0—1,5	4—6 Co 0,15—0,3 Li 0,15—0,25 В 0,01—0,2 К 0,05—0,15 Na 0,1—0,2 Р	940	980
ВПр13	20—23	10—13	0,2—0,4	—	0,5—2,0 Zn 0,1—0,3 В 21—25 Ag 0,1—0,3 Р	850	910
45А	30	5	—	—	3 Zn	880	900
КП	—	19—20	4,5—5	5—6	—	950	970
ПЖ45-81	2,0—3,0	30—35	1,5—2,0	2,5—3,0	2,5—3,5 Cr	1120	1200
ПМН10	—	10	—	—	2—3 Cr	1110	1140
ГПФ	4,2—5,0	10—14	1—1,8	12—14	—	1190	1280

14. Физические свойства медно-никелевых припоев

Марка	$\alpha \cdot 10^6, 1/^\circ\text{C}$						$\lambda, \text{ кал/см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}$							$\gamma, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\frac{\rho \cdot 10^8}{\sigma_{\text{М}} \cdot \text{мм}^2}$ М	
	Температура, $^\circ\text{C}$															
	20—100	20—200	20—300	20—400	20—500	20—600	25	100	200	300	400	500	600			
ВПр1 (ПЖЛ-500) ВПр2 (ПМ20МЛ) ВПр13 ВПр4 ПЖ 45-81	17,1	17,7	18,4	18,8	19,8	20,9	0,077	0,083	0,092	0,10	0,11	0,12	0,12	—		
	19,0	19,8	20,5	21,2	21,8	—	0,031	0,037	0,045	0,054	0,064	0,071	0,076	8		
	—	—	—	—	18,6	—	0,024	0,03	0,038	0,046	0,053	0,064	—	—		
	16,8 14,6	17,4 15,2	17,9 15,7	17,7 16,3	18,3 16,9	19,1 17,0	— 0,057	0,030 0,063	0,035 0,070	0,041 0,078	0,046 0,084	0,051 0,084	0,056 0,091	— 41,0		

15. Механические свойства паяных (внахлестку) соединений, выполненных медными припоями

Марка	Флюс или газовая среда	Метод нагрева	Паяемый материал	$\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ² , при температурах, °C						Предел выносливости, кгс/мм ² на базе 10 · 10 ⁶ циклов при температуре, °C	
				—60	20	200	400	600	20	500	
ВПр1 (ПЖЛ-500)	200, 201	В пламени горелки	12X18H10T	48—58	37—50	30—40	19—22	9—16	25	20	
ВПр2 (ПМ20МЛ)	Аргон	В печи	12X18H10T	26—28	25—30	—	—	—	—	—	
ПМ38МА			X15H9Ю X15H5AM3	25—30 19—30	21—30 21—25	20—30 19—23	19—24 21—25	12—14 —	19,4 22	27,5 21,5	
Медь (М1)	Водород 200, 201	В пламени горелки	12X18H10T	—	21—30	—	—	—	—	—	
ПЖ 45-81			Сталь 10	—	17—20	—	—	—	—	—	—
Л63 ЛОК62-06-04 ПМЦ48	Бура Бура Бура		12X18H10T X20H80	—	45—47 59—61	—	—	18—19 28—30	20	17	
			Сталь 10 То же »	—	27,5 31,6 20,9	—	—	—	—	—	—
ВПр4	Аргон	В печи	2X18H10T	45—52	33—40	29—33	26—31	13—18	—	—	

При пайке нержавеющей сталей припоями ВПр1, ВПр2, ВПр4 не происходит заметного растворения основного металла, что позволяет применять их для пайки тонкостенных изделий [4].

Медно-фосфорные припои. Сплавы меди с фосфором (4—9%) обладают высокой жидкотекучестью и сравнительно низкой температурой плавления, их применяют как заменители серебряных и медно-цинковых припоев при пайке меди и ее сплавов (рис. 3, табл. 16).

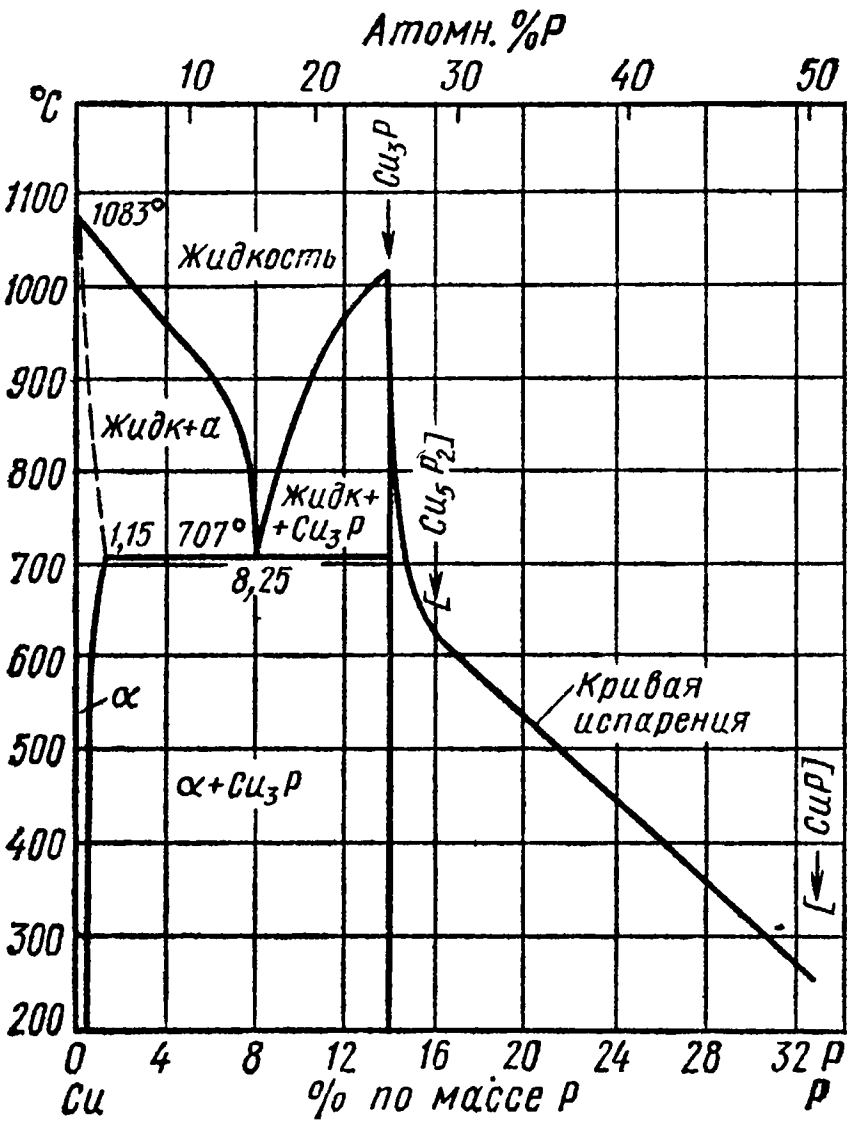


Рис. 3. Диаграмма состояния сплавов системы медь — фосфор

Медно-фосфорные припои обладают самофлюсующими свойствами и позволяют производить пайку меди и некоторых ее сплавов без применения флюсов. При пайке латуни Л63, нейзильбера,

16. Сплавы меди с фосфором (по ГОСТ 4515—48)

Марка	Содержание фосфора, % (Cu — остальное)	Примеси, %, не более			Температура, °C	
		Bi	Sb	всего примесей	начала плавления	полного расплавления
МФ1	8,5—10	0,002	0,002	0,4	714	850
МФ2		0,005	0,1	0,8		
МФ3	7—8,5			1,0		

алюминиевой бронзы и медно-никелевых сплавов этими припоями необходимо применять боросодержащие флюсы.

Медно-фосфорные припои для пайки чугуна и сталей не применяют из-за образования хрупких фосфидов железа в паяном шве, что приводит к потере пластичности и охрупчиванию.

Барьерные покрытия на паяемых поверхностях (никелирование, меднение) частично препятствуют образованию хрупких фосфидных прослоек и позволяют получать пластичные соединения.

Введение в эвтектический сплав медь — фосфор олова и цинка снижает температуру его плавления и повышает пластичность (табл. 17).

17. Медно-фосфорные припои

Марка	Содержание элементов, % (Cu — остальное)					Температура, °C	
	P	Zn	Sn	Примеси, не более		начала плавле- ния	полного расплав- ления
				Bi	Sb		
ПФО-7 (МФОЦ-7-3-2)	5—7	1—3	2.5—3.5	0,005	0,1	680	700
ПМФ-7 (МФ-3)	7,0—8,5	—	—	—	—	714	850
ПМФ-9	9	—	—	—	—	707	800

18. Физические свойства медно-фосфорных припоев

Марка	$\alpha \cdot 10^6, 1/^{\circ}\text{C}$						$\lambda, \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C})$							$\gamma, \text{ г}/\text{см}^3$	$\rho \cdot 10^8, \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	
	Температура, $^{\circ}\text{C}$															
	20—100	100—200	200—300	300—400	400—500	500—600	20	100	200	300	400	500	600			
ПМФ-7 (МФ-3) ПФО-7 (МФОЦ-7-3-2)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,5	1,7	
	19,45	21,0	24,6	28,9	30,4	31,2	0,07	0,073	0,076	0,082	0,080	0,088	0,087	8,0	31,7	

19. Временное сопротивление (кгс/мм²) паяных соединений, выполненных медно-фосфорными припоями

Марка	Встык		Внахлестку														
	медь + медь	латунь + латунь	медь + медь					латунь + латунь									
			Температура, °C														
			20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	200	200	300
ПМФ-7 (МФ-3) ПМФ-9 ПФО-7 (ПФОЦ-7-3-2)	12,6	14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12	13,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	15—19	17—21	19—22	15—20	17—20	14—15	9—12	32—34	17—21	26—27	19—21	13—16					

20. Медно-фосфорные припои с серебром, никелем и сурьмой

Марка	Содержание элементов, %					Темпера- тура пайки, °C
	Cu	P	Ag	Ni	Sb	
ПСрФ 2-5	90—93	5	2—5 10 15	—	—	800—820 730 820
ПСрФ 15-5	85 80	7 5	18 25			750
ПСр 25Ф	75 70		6	—	9 — 18	2 — 13 —
—	92	1 5 2				
—	90					
—	82					
—	80					

21. Медно-фосфорные припои, применяемые в США (по ASTM)

Марка	Содержание элементов, % (Cu — остальное)					Температура, $^\circ\text{C}$			
	Содержание элементов, % (Cu — остальное)					Температура, $^\circ\text{C}$			
	P	Ag	общая сумма других элементов	начала плавления	полного расплавления	пайки			
BCuP-1	4,75—5,25	—	0,15	705	900	790—925			
BCuP-2	6,75—7,50	—	—	705	805	805—845			
BCuP-3	6,00—6,50	—	—	650	815	815—815			
BCuP-4	6,75—7,80	—	0,15	640	750	750—815			
BCuP-5	4,75—5,25	—	—	640	815	815—830			
BCu	6,90—7,10	—	—	—	650	650—800			

Технологические свойства припоев повышают введением в их состав сурьмы, никеля, серебра. Эти припои нашли широкое применение в электротехнической промышленности (табл. 18 и 19).

22. Предел прочности ($\tau_{ср}$, $\sigma_{в}$, кгс/мм²) соединений на меди, паянных медно-фосфорными припоями

Марка	Внахлестку, $\tau_{ср}$ Встык, $\sigma_{в}$			
	температура, °С			
	20	200	—195	20
BCuP-2	14,0	7,5	12,5	21,8
BCuP-4	14,1	—	15,0	19,5
BCuP-5	14,3	7,6	15,4	19,0

Медно-фосфорные припои с серебром (табл. 20) более пластичные и легкоплавкие, их применяют для пайки изделий из меди с закрытыми соединениями, где удаление остатков флюса произвести невозможно [12].

Недостатком этих припоев является способность их к ликвации и образованию ликвационной пористости. Припои требуют быстрого нагрева.

Медно-фосфорные припои широко используют в США (табл. 21 и 22).

СЕРЕБРЯНЫЕ, ЗОЛОТЫЕ, ПАЛЛАДИЕВЫЕ И ПЛАТИНОВЫЕ ПРИПОИ

Припои, содержащие серебро и золото, обладают повышенной тепло- и электропроводностью, высокой пластичностью, прочностью, коррозионной стойкостью и технологичностью. Поэтому такие припои нашли широкое применение при пайке изделий вакуумной техники и конструкций, подвергающихся высоким механическим нагрузкам. Они хорошо смачивают металл и затекают в зазоры. Недостаток — высокая стоимость и дефицитность серебра и золота.

Серебряные и палладиевые припои. Серебро имеет температуру плавления 960° С, в качестве припоя применяют сравнительно редко. В промышленности используют припои на основе серебра с содержанием меди, цинка, кадмия, олова, фосфора и других элементов (табл. 23—25) [3].

Высокая пластичность припоев с медью, состоящих из твердых растворов на основе серебра и меди (рис. 4), отсутствие элементов с высоким давлением пара и низкая стойкость окислов послужили причиной их широкого применения при пайке изделий из меди и стали, работающих в условиях повышенных статических и вибрационных нагрузок. При пайке этими припоями применимы существующие виды нагрева, флюсы, газовые среды и вакуум.

Особенно широкое применение получил припой ПСр72 — сплав эвтектического состава, обладающий высокой технологичностью.

Припой ПСр 92, смачивая сталь, не проникает по границам зерен, не охрупчивает основной металл, вследствие чего не снижает механические свойства высокопрочных нержавеющей сталей переходного класса, термически обработанных ($\sigma_{в} > 100$ кгс/мм²).

Температура плавления серебряных припоев с медью может быть понижена путем введения лития, незначительные добавки которого улучшают смачиваемость ими паяемой поверхности и придают им свойства самофлюсования [21].

Серебряные припои с литием (табл. 26) позволяют производить пайку нержавеющей сталей в печах с инертными газовыми средами и в вакууме при сравнительно низких температурах (850—900° С) и получать паяные соединения с хорошим формированием шва. Введение в серебряные припои наряду с медью цинка (рис. 5) снижает температуру плавления их, изменяет свойства и фазовый состав сплавов (рис. 6, табл. 27).

Серебряные припои с медью и оловом (рис. 7) обладают сравнительно низким давлением пара, вследствие чего их применяют для пайки вакуумных приборов [5], изготавливаемых из меди и стали (табл. 28).

Введение больших количеств олова снижает температуру начала плавления и позволяет паять разнородные материалы, имеющие различные коэффициенты линейного расширения, без образования трещин.

Дальнейшего снижения температуры плавления припоев на основе серебра достигают введением в их состав кадмия (рис. 8) и цинка (табл. 29).

23. Многокомпонентные серебряные припои (по ГОСТ 19738—74)

Марка	Содержание элементов, %							Примеси, % не более
	Ag	Cu	Zn	P	Cd	Sn	Mn	Ni
ПСр 71	70,5—71,5	Остальное	—	0,8—1,2	—	—	—	—
ПСр 25Ф	24,5—25,5		—	4,5—5,5	—	—	—	—
ПСр 15	14,5—15,5		—	4,5—5,1	—	—	—	—
ПСр 50Кд	49,5—50,5		15,0—17,0	—	Остальное	—	—	—
ПСр 45	44,5—45,5		Остальное	—	—	—	—	—
ПСр 40	39,0—41,0	15,0—17,0 29,5—30,5 16,0—17,4	16,2—17,8	—	Остальное	—	—	0,1—0,5
ПСр 37,5	37,0—38,0	Остальное	5,0—6,0	—	—	7,9—8,5	—	—
ПСр 62	61,5—62,5	27,0—29,0	—	—	—	—	—	—

24. Физические свойства серебряных припоев
(ГОСТ 19738—74)

Марка	γ , г/см ³	Температура, °С		$\rho \cdot 10^8$, Ом·мм ² /м
		начала плавления	полного расплавления	
ПСр 71	9,8	645	795	4,3
ПСр 25Ф	8,3	645	725	18,6
ПСр 15	8,5	640	810	20,7
ПСр 50Кд	9,25	625	640	7,8
ПСр 45	9,1	665	730	10,0
ПСр 40	9,25	590	610	7,0
ПСр 37,5	8,9	725	810	37,2
ПСр 62	9,6	650	723	25,5

25. Серебряные припои с медью

Марка	Содержание элементов, %		Температура, °С		γ , г/см ³	$\rho \cdot 10^8$, Ом·мм ² / м
	Ag	Cu	начала плавления	полного расплавления		
ПСр 50 *	49,5—50,5	Остальное	779	860	9,3	2,5
ПСр 72 *	71,5—72,5	»		779	10	2,1
—	91—93	6,7—8,7	789	890	9,9	—
—	96,0	4,0	880	927	—	—
—	91,6	8,4	782	888	—	—
—	55,0	45,0		840	—	—
—	83,0	17,0		825	—	—
—	60,0	40,0		820	—	—
—	80,0	20,0	779	815	—	—
—	77,0	23,0		798	—	—
—	75,0	25,0		785	—	—

* ГОСТ 19738—74, примеси не более 0,15.

26. Серебряные припои с литием

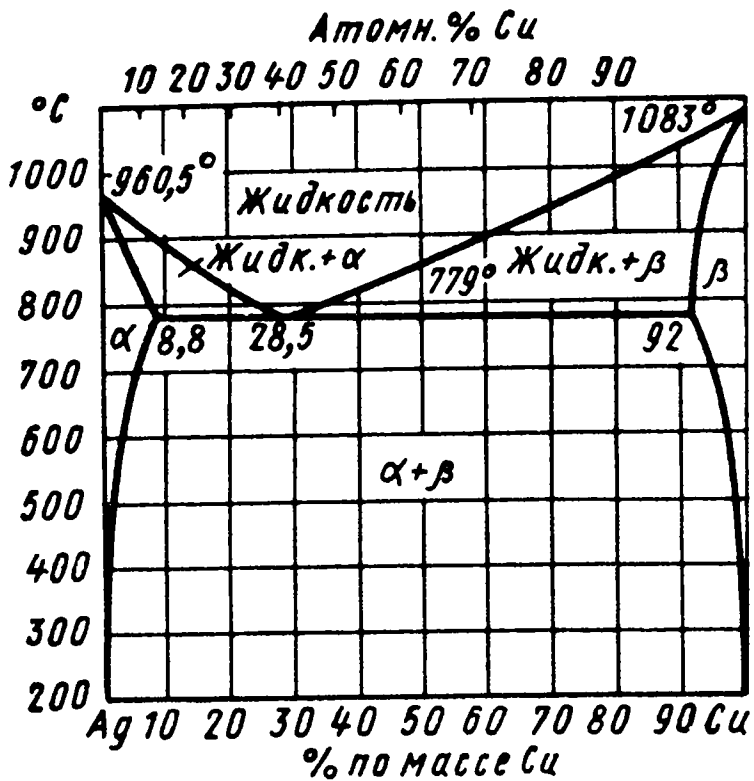


Рис. 4. Диаграмма состояния сплавов системы медь — серебро

Содержание элементов, %					Темпе- ратура полного распла- вления, °C
Ag	Li	Cu	Cd	Дру- гие ме- таллы	
99,5	0,5	—	—	—	940
97,0	3,0	—	—	—	650
91—93 *	0,2—0,4	7,6—7,8	—	—	900
84,8	0,2	—	—	15 Mn	955
79,0	2,0	—	19	—	760
70,8	0,5	21,5	—	—	830
71,8	0,2	28,0	—	—	820
50,0	0,5	17,5	15	17,0 Zn	850
71—73 **	0,15 — 0,25	26,5 — 28,5	—	0,7 — 1,3 Ni	820

* Припой ПСр 92.
** Припой ПСр 72ЛМН.

Кадмий очень сильно снижает температуру плавления припоев, одновременно увеличивая их жидкотекучесть (табл. 30).

Для повышения прочности и коррозионной стойкости при повышенных температурах в состав припоев вводят никель или никель в сочетании с марганцем, что положительно сказывается также и на теплостойкости (табл. 31) [14].

Однако серебряно-марганцовистые припои обладают низкой коррозионной стойкостью в условиях тропиков и солевого тумана.

27. Серебряные припои с медью и цинком

Марка	Содержание элементов, %			При- меси, % не более	Температура, °C		γ, г/см³	ρ · 10⁸, Ом · мм²/м
	Ag	Cu	Zn		начала плавления	полного расплавления		
ПСр 70 *	69,5—70,5	25,5—26,5	3,0—5,0	0,5 **	730	755	9,8	4,2
ПСр 45 *	44,5—45,5	29,5—30,5	23,5—26,0		660	725	9,1	9,7
ПСр 25 *	24,7—25,3	39,0—41,0	33,0—36,5		745	775	8,7	6,9
ПСр 10 *	9,7—10,3	52,0—54,0	35,0—38,5		815	850	8,45	6,5
ПСр 65 *	64,5—65,5	19,5—20,5	13,5—16,0		695	720	9,6	8,6
ПСр 12М *	11,7—12,3	51,0—53,0	34,0—37,5		780	825	8,5	7,6
LAg 25	25	40	35	—	750	830	8,57	—
LAg44	44	30	26	—	670	710	9,12	—
—	74	14	12	—	—	760	—	—
—	54	40	6	—	—	720	—	—
—	43	37	20	—	—	775	—	—
—	40	36	24	—	—	785	—	—
—	30	38	32	—	—	760	—	—
—	25	52	23	—	—	870	—	—
—	20	48	32	—	—	820	—	—
—	15	80	5	—	—	790	—	—
—	15	52	33	—	—	835	—	—
—	5	58	37	—	—	870	—	—

* ГОСТ 8190—56 *.
** В том числе 0,15% Pb.

Для пайки металла или минералонерамики применяют серебряные припои, активизированные титаном, содержание которого в припоях от 8—25%. В качестве такого припоя применяют серебряный припой состава: 15% Ag; 5% Cu; 50% Ni; 5% Mn; 25% Ti.

Палладий, вводимый в качестве компонента для высокотемпературных припоев, значительно повышает коррозионную стойкость.

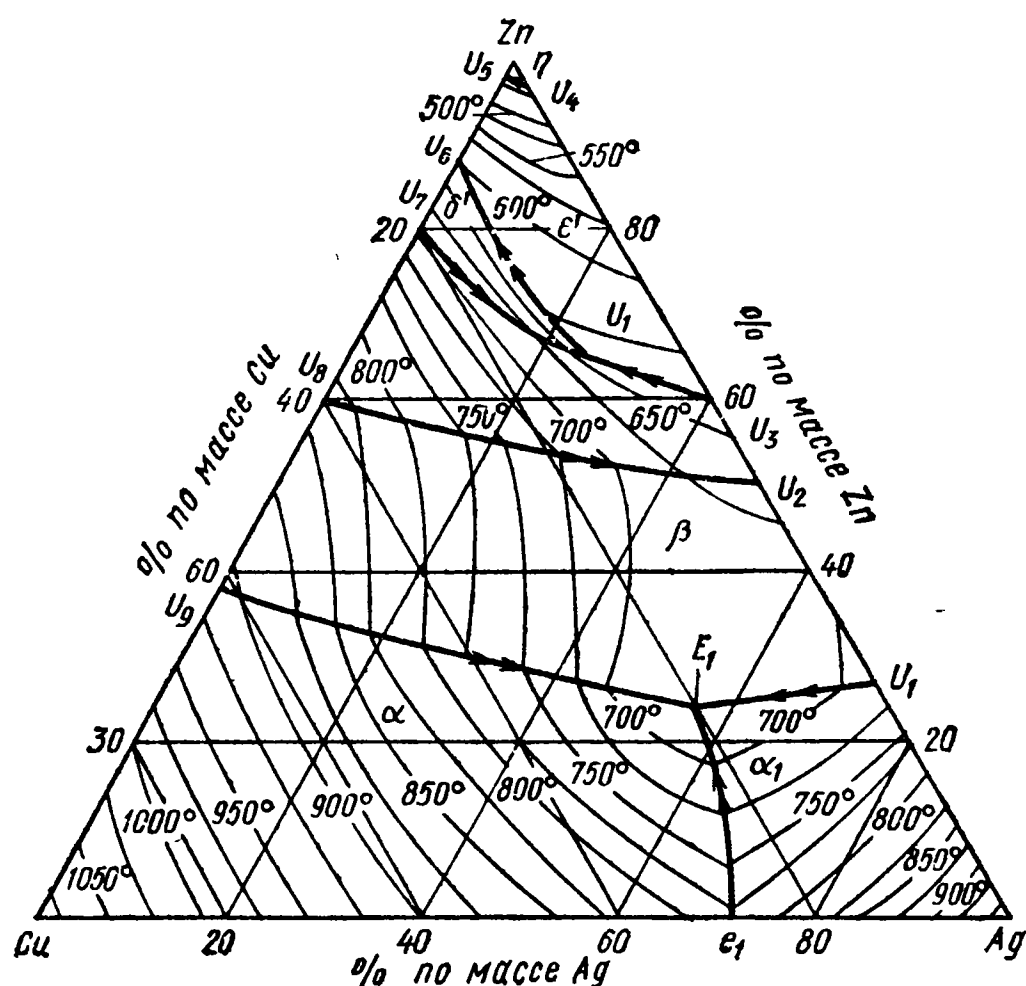


Рис. 5. Изотермы ликвидуса сплавов системы серебро — медь — цинк

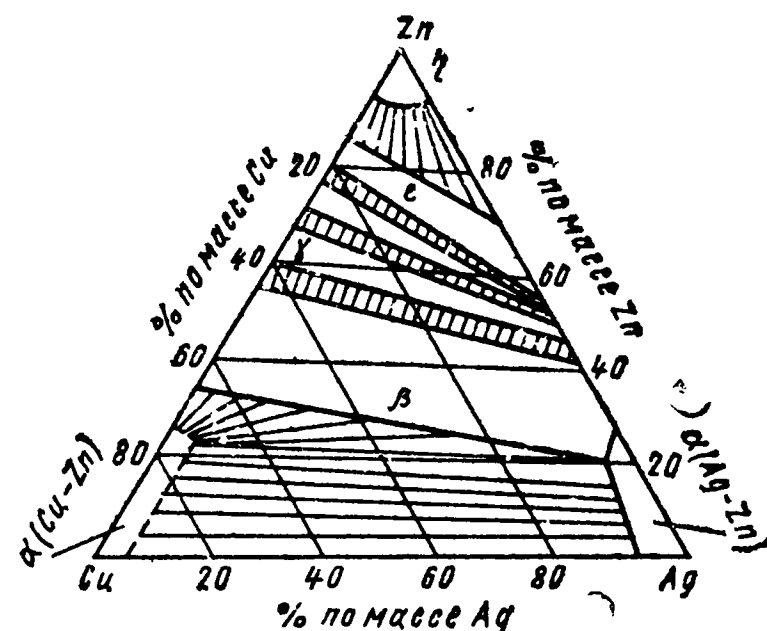


Рис. 6. Фазовый состав сплавов системы серебро — медь — цинк

пластичность, а также способность их растекаться и смачивать паяемую поверхность [7]. Припой с палладием применяют для пайки самых разнообразных металлов: никелевых сплавов, золота, молибдена, циркония, титана, вольфрама, бериллия, нержавеющей сталей, жаропрочных сплавов.

Добавки палладия в припой приводят к снижению способности проникать

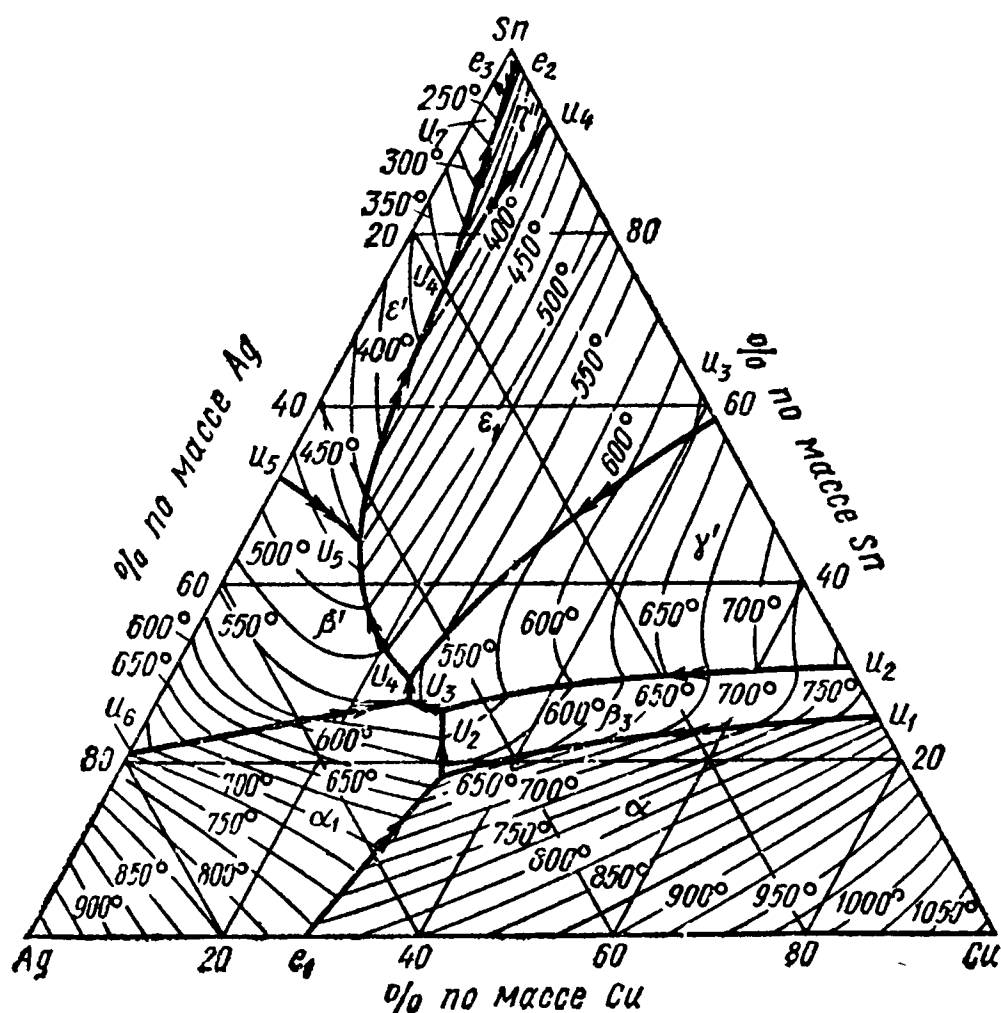


Рис. 7. Изотермы ликвидуса сплавов системы серебро — медь — олово

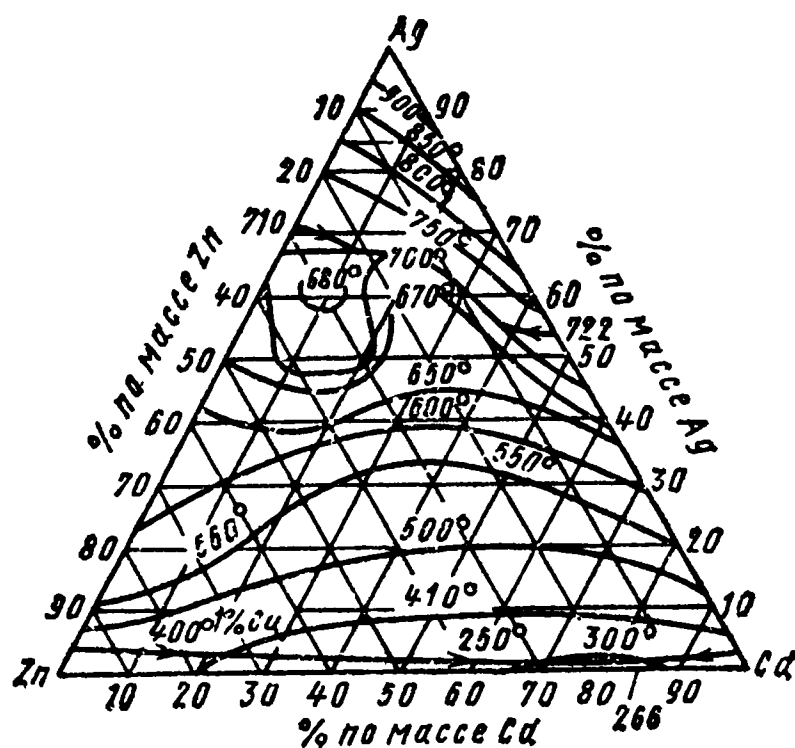


Рис. 8. Изотермы ликвидуса сплавов системы серебро — цинк — кадмий

в паяемый материал и разъедать его, что позволяет производить пайку тонкостенных изделий. В качестве припоев применяют как двойные сплавы системы серебро — палладий, обладающие высокой пластичностью, так и многокомпонентные припои, в состав которых входят серебро, медь, марганец, никель и другие металлы.

28. Серебряные припои с оловом

Содержание элементов, %				Температура полного расплавления, °C
Ag	Cu	Sn	Другие металлы	
7	85	8	—	985
68	27	5	—	755
53	32	15	—	690
62	28	10	—	700
46,5	32,5	21	—	640
60	23	17	—	600
40	35	25	—	579
51	15	34	—	508
49	15	36	—	500
20	3	75	2 Zn	400
63	29	6	2 Ni	820
46	32	22	—	640
60	30	10	—	720
42	33	7	18 Zn	650
40	30	2	28 Zn	770

29. Серебряные припои с кадмием, цинком и медью

Содержание элементов, %				Температура полного расплавления, °C	Содержание элементов, %				Температура полного расплавления, °C
Ag	Cu	Cd	Zn		Ag	Cu	Cd	Zn	
45	15	24	16	607	75	15	5	5	750
50	16	16	18	620	35	26	18	21	760
50	15	10	25	640	10	40	10	40	765
40	18	27	15	650	14—16	49	8—12	23—29	760
58	25	14	3	690	31,5	34	19	15,5	754
35	26	18	21	700	65	20	6	9	730
20	30	20	30	710	60,5	22,5	10	7	724
63	20	10	7	720	75	15	5	5	748
65	20	2	13	720	20	30	20	30	710
25	35	15	25	725	65	20	2,5	12,5	719
65	20	10	5	745	12	52	7	29	800
75	15	5	5	748	9	53	10	28	852

30. Серебряные припои с кадмием и цинком

Содержание элементов, %			Температура, °C		Содержание элементов, %			Температура, °C	
Ag	Cd	Zn	начала плавления	полного расплавления	Ag	Cd	Zn	начала плавления	полного расплавления
20	20	60	460	580	50	40	10	640	670
10	20	70	480	510	60	10	30	—	680
20	40	40	470	500	60	20	20	—	680
20	60	20	470	500	60	30	10	—	680
40	30	30	580	600	70	10	20	710	720
40	50	10	580	640	70	20	10	730	820
50	10	40	670	760	40	10	50	630	640
50	20	30	670	700	40	20	40	600	620
50	30	20	630	660	40	40	20	580	600

31. Серебряные припои с никелем и марганцем

Содержание элементов, %					Температура полного расплавления, °C
Ag	Cu	Zn	Ni	Mn	
45	38	—	2	15	680
55	31	12	2	—	730
65	28	—	2	5	755
62	33	—	5	—	755
54	39	5	2	—	800
85	—	—	—	15	960

32. Серебряные припои с палладием

Содержание элементов, %			Температура полного расплавления, °C	Содержание элементов, %			Температура полного расплавления, °C
Pd	Cu	Ag		Pd	Cu	Ag	
10	—	90	1065	87	—	13	1500
16	84	—	1100	30	70	—	1119
20	—	80	1153	40	60	—	1149
40	—	60	1293	63	37	—	1243
70	—	30	1443	—	—	—	—
80	—	20	1486	81	19	—	1352

33. Серебряные припои с палладием (ФРГ)

Марка	Содержание элементов, %					Температура, °C	
	Ag	Cu	Mn	Ni	Pd	начала плавления	полного расплавления
SCP-1	68,4	26,6	—	—	5	807	810
SCP-2	58,5	31,5	—	—	10	824	852
SCP-3	65,0	20	—	—	15	850	900
SCP-4	54,0	21,0	—	—	25	901	950
SCP-7	52,0	28,0	—	—	20	879	898
SPM-1	75,0	—	5	—	20	1000	1120
NMP-1	—	—	31	48	21	1120	1120
SPM-2	64	—	3	—	33	1180	1200

Палладий с серебром образует ряд твердых растворов (рис. 9) с небольшим интервалом кристаллизации. Меняя соотношение палладия и серебра в припое, есть возможность регулировать температуру плавления в широком диапазоне (1000—1500° С). Палладий с медью также образует ряд твердых растворов с различной температурой плавления (1100—1550°С) (табл. 32, 33).

Более низкую температуру плавления имеют припои системы палла-

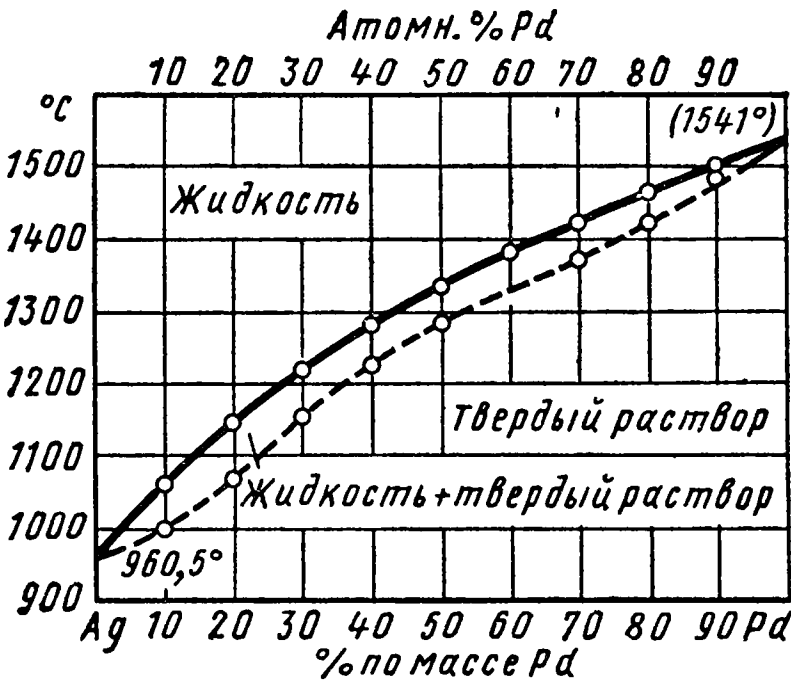


Рис. 9. Диаграмма состояния сплавов системы серебро — палладий

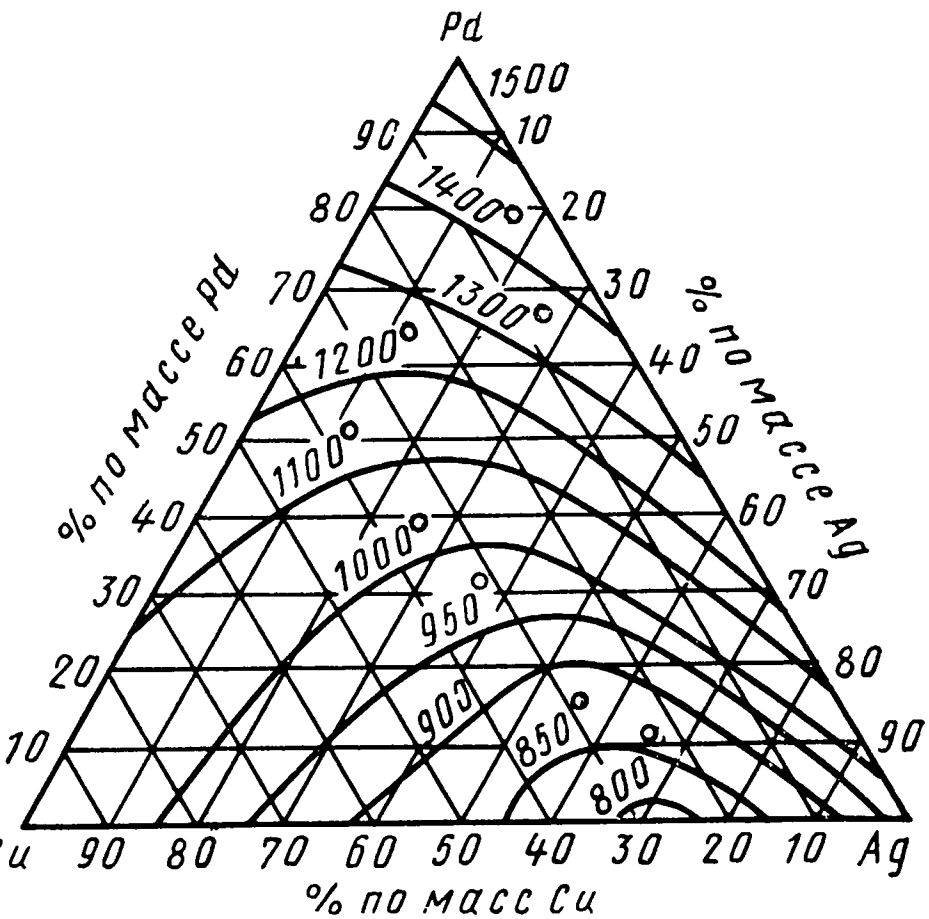


Рис. 10. Изотермы ликвидуса сплавов системы палладий — серебро — медь

дий — серебро — медь (рис. 10). Добавка лития способствует лучшему растеканию припоя и придает им самофлюсующие свойства.

При вакуумной пайке применяют палладиевые припои с никелем, а также припои системы палладий — никель — олово — кремний [9], предназначенные для пайки высоколегированных сталей, хромоникелевых сплавов, способных работать при повышенных температурах (до 750° С, табл. 34).

Золотые и платиновые припои. Существующие припои на основе золота обладают рядом ценных свойств — пластичностью, коррозионной стойкостью, электропроводностью, теплопроводностью и т. д.

34. Многокомпонентные припои с палладием

Содержание элементов, %					Температура, °С	
Pd	Ni	Sn	Si	Прочие элементы	начала плавления	полного расплавления
20	30	45	5	—	1000	1015
20	49	24	7	—	1010	1032
20	51	24	—	—	1005	1025
20	45	30	—	—	1038	1088
10	58	27	5	—	1045	1082
30	45	20	—	—	1077	1182
60	40	—	—	—	1237	1237
97	—	—	—	3 В	—	—
93	—	—	—	7 Al	1050	1100
66,5	28,8	1,2	—	3,5 Li	—	—
77,5	20,0	1,0	—	1,5 Li	—	—
2,2	84,0	7,5	5,5	0,8 Li	—	—

35. Золотые припои с медью

Содержание элементов, %		Температура, °С		
Au	Cu	начала плавления	полного расплавления	пайки
94	6	950	980	1030
80	20	889	889	890—1010
50	50	928	950	980—1000
37,25 - 37,75	62,25 - 62,75	950	990	990—1090
40	60	946	985	1035
37,5	62,5	—	970	990
35	65	970	1010	1040
30	70	990	1020	1060

Золото в чистом виде как припой применяется редко, но оно образует твердые растворы со многими металлами, чем пользуются при разработке пластичных припоев.

Однако применение их ограничивается дороговизной и дефицитностью золота, поэтому золотые припои используют только там, где это оправдано (пайка вакуумных приборов, вакуумно-плотные соединения, электроконтакты и т. д.).

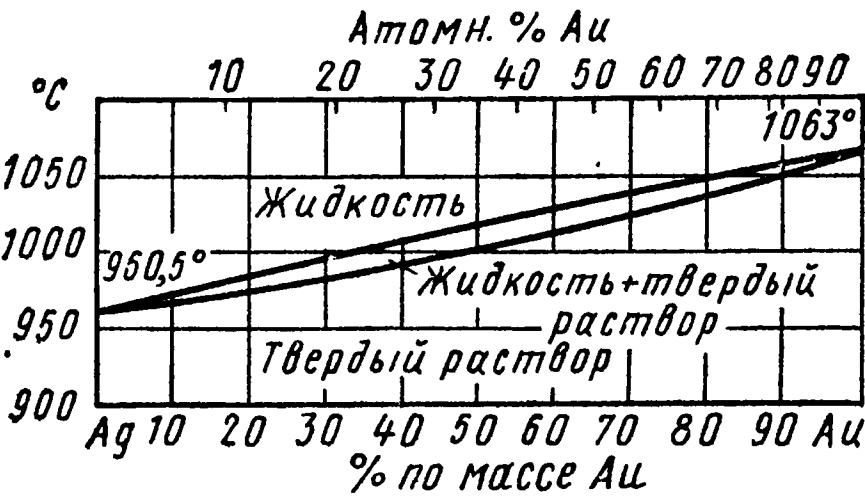


Рис. 11. Диаграмма состояния сплавов системы золото — серебро

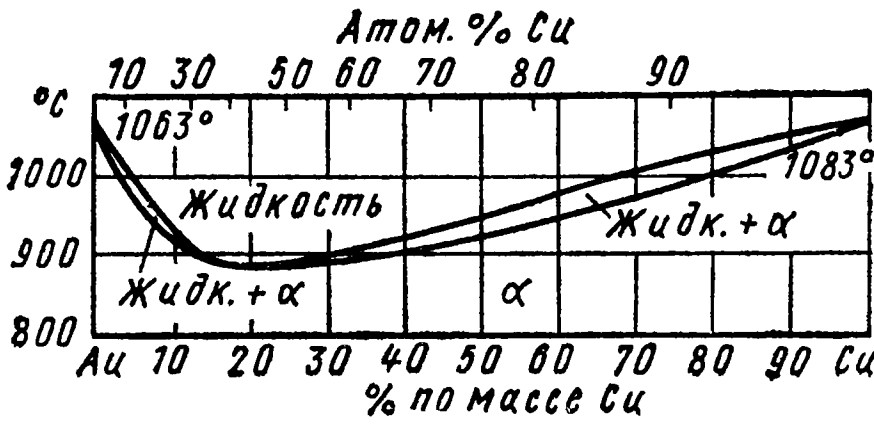


Рис. 12. Диаграмма состояния сплавов системы золото — медь

При пайке изделий с вакуумно-плотными соединениями применяют в основном сплавы золота с медью, которые между собой образуют непрерывный ряд твердых растворов (рис. 11 и 12).

Минимальная температура плавления сплава 80% Au, 20% Cu 889° С (табл. 35). Введение в состав медно-золотых припоев серебра (табл. 36), с которым золото образует также ряд твердых растворов, позволяет несколько снизить температуру их плавления. Эти припои нашли использование при пайке молибдена и соединения графита с металлом.

Дальнейшего снижения температуры плавления этих припоев достигают введением в их состав цинка, кадмия и индия (табл. 37—38).

Сплавы золота с германием при содержании германия ~12% и кремния ~ 6% пластичны и плавятся соответственно при температурах 365 и 370° С.

36. Золотые припои с медью и серебром

Содержание элементов, %			Температура, °С	
Au	Ag	Cu	начала плавления	полного расплавления
50,0	10,0	40,0	862	880
41,7	2,8	55,5	—	963
60,0	20,0	20,0	850	870
75,0	7,5	17,5	880	895
50,0	20,0	30,0	831	846
58,3	30,0	11,7	835	880
58,3	20,0	21,7	829	847
33,3	33,3	33,4	823	877
33,3	40,0	26,7	780	780

37. Золотые припои с серебром, медью, цинком, кадмием

Содержание элементов, %					Температура, °С	
Au	Ag	Cu	Cd	Zn	начала плавления	полного расплавления
58,5	4,9	25,6	2,0	9,0	790	837
75,0	7,5	7,5	7,0	3,0	—	800
75,0	2,8	11,2	2,0	9,0	747	788
75,0	9,0	6,0	—	10,0	730	783
75,0	—	15,0	8,2	1,8	793	822
75,0	2,8	11,2	9,0	2,0	738	760
58,5	8,0	22,0	9,4	2,1	744	776
58,5	4,9	25,6	9,0	2,0	738	760
58,5	11,9	25,6	—	4,0	816	854
58,5	10,3	24,2	—	7,0	804	836
58,0	24,2	10,8	—	7,0	765	808
33,3	35,0	21,7	—	10,0	725	759
33,3	30,0	16,7	—	20,0	695	704
58,5	—	29,5	9,8	2,2	748	793
58,3	16	21,7	2,0	3,0	795	840

Для пайки золотых изделий или изделий, покрытых золотом, применяют припой с содержанием 46% Au, 18% Zn, 3% Si, 32% Sb и 1% Ni. Он имеет сравнительно низкую температуру плавления (590° С), хорошо растекается по паяемой поверхности и не растворяет паяемый металл.

Припой с более высокой температурой пайки (740° С) ЗЛСрМ583-80 содержит 58,3% Au, 13—14% Ag, 10% Cd, 5—6% Zn и Cu — остальное.

38. Золотые припои с палладием и индием

Содержание элементов, %						Температура, °С	
Au	Ag	Cu	Pd	Cd	In	начала плавления	полного расплавления
38	20	20	3	18	1	630	695
48	16	20	5	10		700	800
65	2	13	5	14		720	795
55	10	12	8	14		750	835
70	6	10	5	8		780	885
55	11	15	10	8	2	830	900
55	12	15	10	6		825	910
70	10	5	5	9		790	925
70	—	25	5	—		940	967
51	—	34	15	—		1000	1030

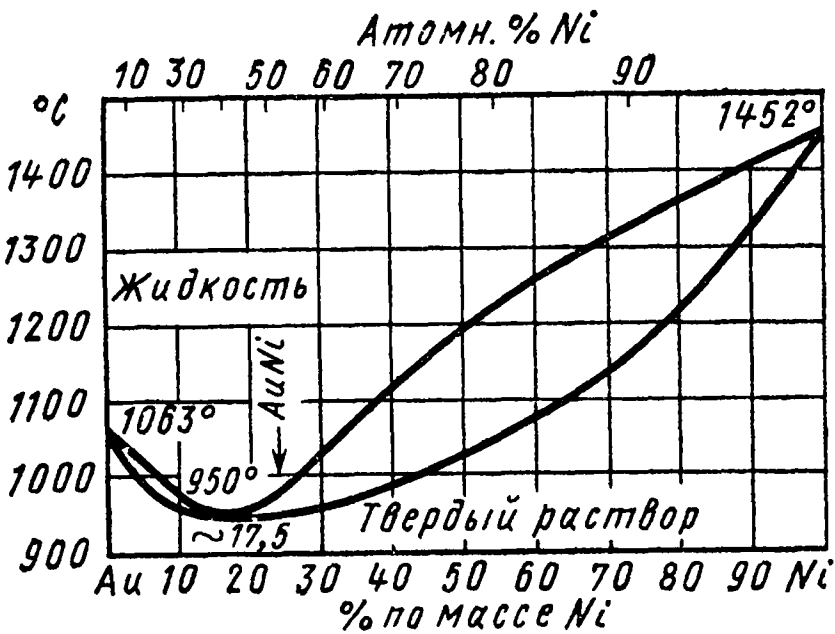


Рис. 13. Диаграмма состояния сплавов системы золото — никель

В отдельных случаях для монтажной пайки изделий из высокопрочных, нержавеющих сталей применяют золотые припои с никелем. Минимальная температура плавления этих сплавов при содержании 17,5% Ni 950° С (рис. 13).

Сплавы золота с никелем получили широкое применение в ракетостроении для пайки деталей, работающих при повышенных температурах, где требуются от паяных соединений высокие физические, механические и жаропрочные свойства [10].

Для придания золотым припоям повышенной коррозионной стойкости и жаропрочности в его состав вводят хром.

Припой с содержанием 6% Cr и 22% Ni с температурой плавления 975—1000° С позволяет выполнять соединения на деталях из нержавеющей сталей, удовлетворительно работающих при температурах до 600° С.

Золотые припои применяют для пайки платины и ее сплавов, в этом случае в их состав вводят палладий, повышающий смачивающую способность (табл. 39).

Для пайки стекла со стеклом или металлом используют сплавы золота с индием, который сильно снижает температуру плавления припоя.

Припой состава 80% Au и 20% In имеет температуру плавления 550° С и пайки 630° С.

39. Многокомпонентные золотые припои с палладием

Содержание элементов, % (Ag — остальное)						Температура пайки, °С
Au	Pd	Cu	Zn	Ni	Mn	
45—58,3	4—6	5—7,5	1—2	—	—	950—1000
55—58,3	8—10	2—3	1,0	0,1—0,3	0,1	1100—1130
75	8,0	7,5	2,0	—	—	—
75	8,0	6,5—7,5	—	—	—	1100—1130
45—58,8	8,0	3—5	1,0	0,1—0,3	0,1	1030—1070

40. Платиновые припои (по ГОСТ 13498—68)

Марка	Содержание элементов, %						Температура, °С	
	Pt	Ir	Rh	Cu	Другие элементы, не более	Примеси, не более	начала плавления	полного расплавления
Пл99,93	≥ 99,93	—	—	—	0,15 Pd	0,07	1769	1769
ПЛИ-5	94,7—95,3	4,7—5,3	—	—	0,15 Pd		1765	1772
ПЛИ-10	89,7—90,3	9,7—10,3	—	—	0,15 Ir		1780	1795
ПлПд-15	84,5—85,5	14,5—15,5 Pd	—	—			—	1800
ПЛИ-15	84,6—85,4	14,6—15,4	—	—			1800	1830
ПЛИ-17,5	82,1—82,9	17,1—17,9	—	—			1807	1837
ПлПд-20	79,5—80,5	—	—	—	0,15 Pd	0,25	—	1830
ПЛИ-20	79,5—80,5	19,5—20,5	—	—			1815	1845
ПЛИ-25	74,5—75,5	24,5—25,5	—	—			1840	1875
ПЛИ-30	69,5—70,5	29,5—30,5	—				1920	1950
ПлРд-10	89,7—90,3	—	9,7—10,3	—	—	0,22	1845	1855
ПлРд-20	79,6—80,4	—	19,6—20,4	—	—	0,23	1895	1905
ПлРд-40	59,5—60,5	—	39,5—40,5	—	—		1940	1950
ПлМ-2,5	97,2—97,8	—	—	2,2—2,8	0,20		1750	1760
ПлМ-8,5	91,1—91,9	—	—	8,1—8,9	0,20	0,25	1690	1720
ПлН-1,5	95,1—95,9	—	—	—	4,1—4,9 Ni		1720	1750
Pt-Ag *	70,0				30 Ag		1185	1560
Pt-Au *	30,0				70 Au	0,23	1200	1440

* Не стандартизованы.

Содержание фосфора в паяном шве в процессе диффузионной пайки резко уменьшается из-за интенсивной диффузии фосфора в паяемый материал.

Высокой коррозионной стойкостью обладают припои с индием (Ni—In). Из-за испарения индия пайку с такими припоями не следует проводить в вакууме (табл. 42).

42. Никелевые припои с кремнием, железом и индием

Содержание элементов, % (Ni — остальное)				Температура, °С	
Cr	Fe	Si	In	начала плав-ления	полно-го рас-плав-ления
14	6	—	—	1395	1425
20	—	10	—	—	1170
—	—	—	39	910	—
17	—	9,2	9,2	1030	—
33,3	—	16,7	16,7	—	—
18	—	—	11	—	1120
20	10	—	—	—	1120
—	2	12	—	—	1130

43. Никелевые припои с кобальтом, титаном, оловом и алюминием

Содержание элементов, % (Ni — остальное)							
Cr	Fe	C	Co	Mo	Sn	Ti	Al
15	0,36	0,02	—	—	—	0,5	3,0
15	7,0	0,04	—	—	—	2,5	0,6
20	0,6	0,10	13,7	4,15	—	2,29	2,87
15	1,0	0,10	29,0	30	—	2,0	3,0
4	—	—	4	—	29	—	—
—	—	—	6	—	30	—	—
—	—	—	8	—	29	—	—
—	—	—	6	—	35	—	—
—	—	—	5	—	—	28*	—

* Содержит 15% Cu.

Соединения, выполненные диффузионной пайкой припоями Ni—P и Ni—In, имеют значительно более высокую температуру распая и достаточно высокую жаропрочность, обусловленную диффузией хрома из основного материала.

Припои системы Ni—B малопластичны, так как бор малорастворим в никеле и образует с ним хрупкие фазы Ni₃B, припои состоят из двух фаз: Ni и Ni₃B [11].

Обычно такие припои применяют в виде порошков, паст и литых прутков, а в некоторых случаях припои наносят на паяемую поверхность методом напыления.

В виде паст припои изготавливают путем перемешивания порошка с 10%-ным раствором акриловой смолы БМК-5 ТУ6-01-432-69 в растворителе Р-5 ТУ6-10-1251-72.

Особенностью никелевых припоев с бором или фосфором является их высокая способность к межзеренному проникновению и растворению никелевых сплавов в процессе пайки. Влияние бериллия на никелевые сплавы аналогично бору и фосфору.

Введение кобальта (до 8%) несколько уменьшает интенсивность растворения паяемого материала. Иногда с целью уменьшения растворения паяемого материала его покрывают слоем никеля (10—15 мкм), который служит как бы барьером между припоем и паяемым материалом.

Припои системы Ni—Si (до 10% Si) состоят из эвтектики: Ni (α) и химического соединения Ni₂Si. В практике обычно применяют сложнелегированные никелевые припои на основе эвтектик и твердых растворов.

Разработаны припои, содержащие помимо никеля и кремния хром и кобальт, повышающие жаростойкость и жаропрочность припоев. Припои системы Ni—Cr—Si и Ni—Cr—Co—Si, содержащие до 7—7,5% Si, обычно прокатывают, припои с бoльшим количеством кремния применяются в виде литых прутков, порошков и паст.

Введение железа в припои этих систем улучшает смачиваемость припоями никелевых сплавов.

Марганец и углерод упрочняют припои и снижают их температуру плавления (табл. 43 и 44).

Введение молибдена, вольфрама, алюминия и титана несколько повышает жаростойкость и жаропрочность никелевых припоев.

Введение молибдена, в свою очередь, способствует измельчению зерна и повышению коррозионной стойкости никелевых припоев.

Легирование никелевых припоев бором, литием, калием и натрием (0,2—0,5% В, 0,01—0,25% Li, 0,01—0,25% К и 0,01—0,25% Na) обеспечивает им самофлюсующие свойства и позволяет паять нержавеющие и конструкционные стали в среде аргона без применения флюсов.

44. Никелевые припои с марганцем, молибденом, кремнием и другими элементами

Содержание элементов, % (Ni — остальное)					Температура, °C	
Cr	Fe	Si	Mn	Mo	начала плавления	полного расплавления
—	2	14	0,2	24	1115	1160
—	0,6	10	0,07	17	—	1160
—	—	8	4	17	1050	1150
5	—	10	—	16	1140	1190
—	—	7	8	15	1120	1150
13	—	8	—	15	1040	1190
—	—	5	17	15	980	1010
—	—	5	22	15	965	1000
—	—	5	20	9	1040	1090
10	—	5	13	9	1150	1190
—	—	—	20	—	1250	1280
6—12	—	0,5—1,5	20—30	0,5—0,7	—	1140
8—10	—	—	27—30	—	1120	1150
20	—	10	10	—	—	—
14—16*1	3—5	4—5	—	—	980	1050
16*2	1	1	24	—	—	—
15	8	4	21	—	—	—
19	—	10	10	0,06	—	—
—	—	—	31*3	—	—	1120
10—30	—	0,5—2	20—30	B-0,3	950	1070

*1 Припой марки ВПр11, содержащий также 0,5—0,6% С, 2—3% В, 0,1—1,0% Al.
*2 Содержит также 0,1% С.
*3 Содержит также 21% Pd.

Введение в сложнолегированные припои кобальта (до 10%) улучшает их технологические свойства, содержание кобальта до 16% позволяет применять припои для пайки изделий с широкими зазорами (0,25—0,4 мм). Никелевые припои нашли большое применение в США при пайке сталей и никелевых сплавов в печи с использованием вакуума (табл. 45).

45. Никелевые припои, применяемые в США

Марка	Содержание элементов, % (Ni — остальное)						Температура, °C		
	Cr	B	Si	Fe	C	Другие элементы	начала плавления	полного расплавления	пайки
NST (AMS4775)	13,5	3,5	4,5	4,5	0,8	—	980	1040	1100
MLC (AMS4776)	13,5	3,5	4,5	4,5	0,15	—	970	1080	1130
MLM (AMS54777)	6,5—8,5	3,0	4,5	2,5	0,06	—	970	1000	1050
N130 (AMS4778)	—	3,0	4,5	—	0,15	—	980	1040	1070
NW9 (Microbraz)	11,5	3,0	3,5	3,5	0,15	—	970	1100	1150
N10 (Microbraz-10)	—	—	—	—	0,15	11P	880	880	980
G981 (Microbraz-30)	19,0	—	10,0	—	0,1	—	1080	1130	1170
N50 (Microbraz-50)	13,0	—	—	—	0,1	10P	930	1040	—
N60 (Microbraz-60)	—	—	8,0	—	0,1	17,0Mn	—	1030	—
N45 (Microbraz-45)	—	—	4,5	—	—	6P	—	—	1010
N130 (Microbraz-130)	—	3,0	4,5	—	—	—	—	—	1070
N40 (Microbraz-40)	—	—	9	2	—	9P	—	—	1150
N20 (Microbraz-20)	—	—	12	2	—	—	—	—	1160
N150 (Microbraz-150)	3,5	—	—	—	—	—	—	—	1150
Endewrance 57	5	—	—	34	—	7Co 11P	—	—	1150
Endewrance 56	16	3,5	4,5	4	—	—	—	—	1150
Endewrance 50	—	1,9	3,5	—	—	—	—	—	1100
Endewrance 53	7,0	2,9	4,5	3,0	—	—	—	—	1050

ЖЕЛЕЗНЫЕ И МАРГАНЦЕВЫЕ ПРИПОИ

Припои на основе железа в существующей практике пайки применяют сравнительно редко, объясняется это тем, что, несмотря на их дешевизну, не удастся получить пластичные припои со сравнительно низкой температурой плавления. Одним из первых припоев на железной основе для пайки стали был применен чугун, однако паяные соединения обладают низкой пластичностью, имеет место диффузия углерода в основной металл. Для пайки режущего инструмента с пластинами из быстрорежущей стали и твердых сплавов применяют порошки из ферросплавов (ферромарганец, феррокремний). Введение в железные припои кремния, бора снижает их температуру плавления, а введение вольфрама и хрома повышает их жаростойкость и жаропрочность. Эти припои малопластичны и могут быть применены в виде порошка или паст, приготовленных из них (табл. 46).

46. Железные припои

Содержание элементов, %								Температура, °С	
Fr	Cr	Ni	Al	W	Si	B	Ta	начала плавления	полного расплавления
67—55	13—19	—	—	17—22	—	3—4	—	1260	—
До 83	7—11	—	—	—	2—4	1—2	—	1315	—
60	—	—	—	—	—	—	40	—	1400
74	18	8	—	—	—	—	—	—	1425
55	25	20	—	—	—	—	—	—	1455
70	25	—	5	—	—	—	—	—	1480

47. Марганцевые припои

Содержание элементов, %					Температура полного расплавления, °С	Содержание элементов, %					Температура полного расплавления, °С
Mn	Ni	Cu	Cr	P		Mn	Ni	Cu	Cr	P	
60	40	—	—	—	1005	60	30	10	—	—	—
68	32	—	—	—	1010	54	36	—	—	10	1170
55	36	—	9	—	1120	54	36	—	10	—	—
70	30	—	—	—	1135	50	40	10	—	—	—

Высокотемпературные припои на основе железа могут быть применены при пайке в вакууме или нейтральных газообразных средах (аргон, гелий) тугоплавких металлов. Припои на основе марганца обладают хорошей жидкотекучестью, способностью смачивать паяемый металл, а также высокой пластичностью. Припои применяют для пайки нержавеющей сталей, инконеля, нихрома и других жаропрочных сплавов. Основным компонентом в марганцовистых припоях является никель (табл. 47), с которым марганец образует ряд твердых растворов (рис. 15) и при содержании 39,5% Ni сплав Mn—Ni имеет температуру плавления 1005° С. Пайку этими припоями выполняют при нагреве в печах или т. в. ч. в среде нейтральных газов (аргона, гелия), нагрев желательно производить быстро во избежание испарения марганца из припоя и изменения температуры его плавления. Возможно производство пайки этими припоями в среде сухого водорода или в вакууме (10⁻¹ мм рт. ст.).

Железо с марганцем образует ряд твердых растворов (рис. 16), сплавы обладают высокой пластичностью, однако температура плавления высокая, в связи с чем для пайки сталей их не применяют. Введение в эти сплавы никеля, углерода, меди, кремния, бора позволяет снизить температуру плавления и улучшить технологические свойства (расстекаемость, смачиваемость) припоя.

Железо-марганцовистые припои пластичны, позволяют получать из них полосы, фольгу, что расширяет область их применения. Припой ВЗМИ-49

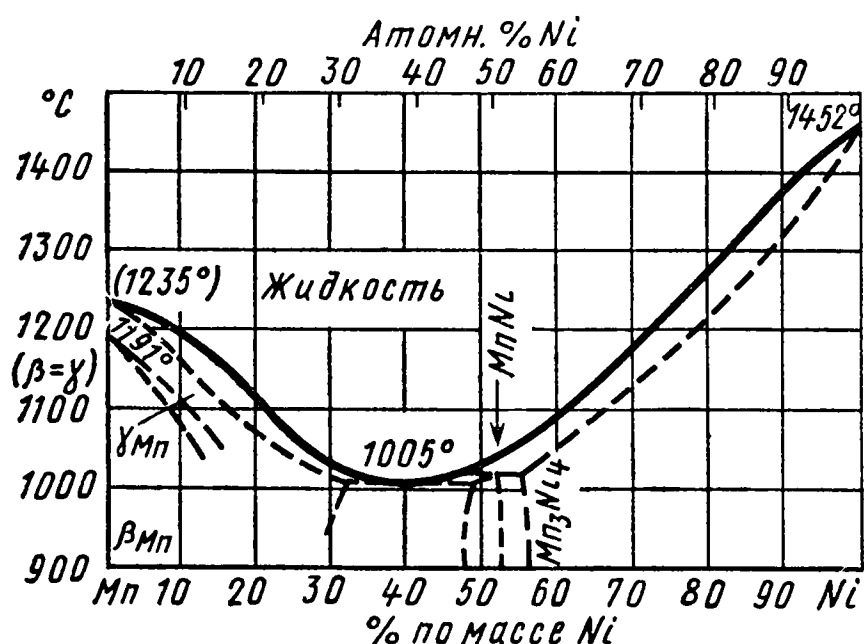


Рис. 15. Диаграмма состояния сплавов системы марганец — никель

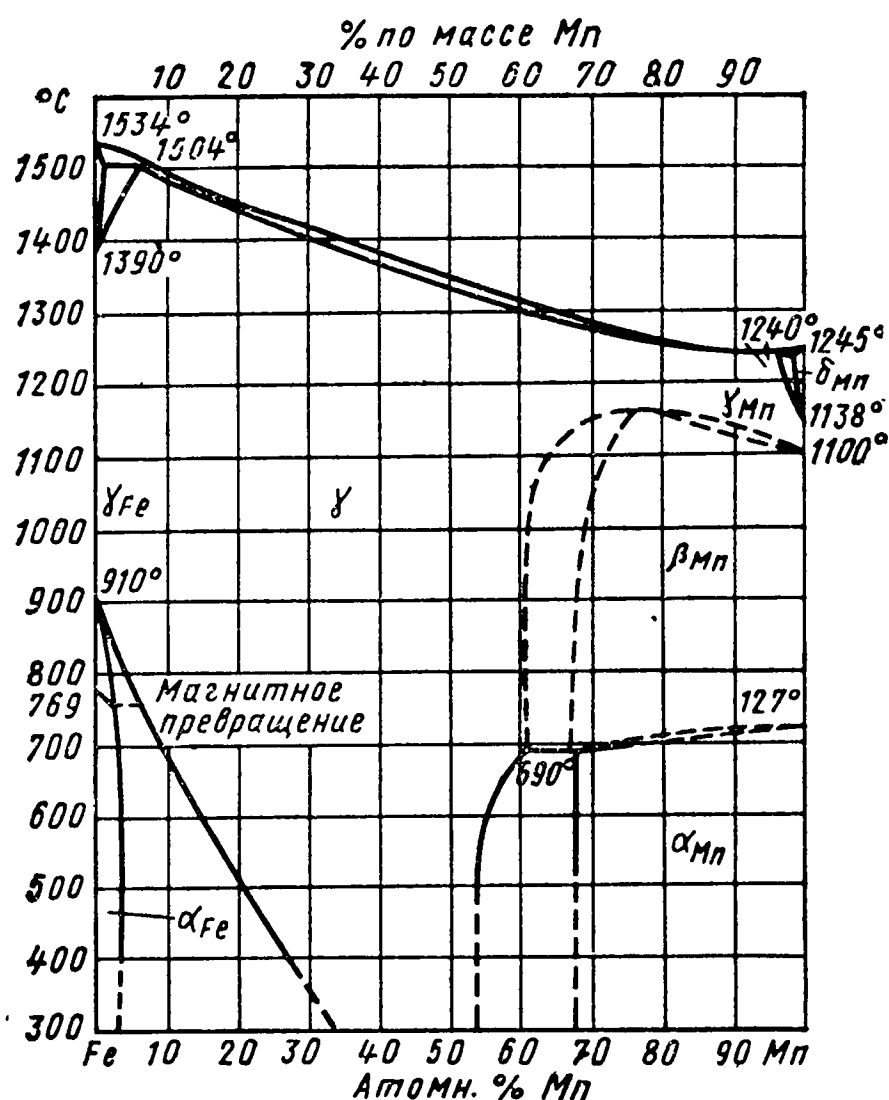


Рис. 16. Диаграмма состояния сплавов системы железо — марганец

(14,5—16,0% Mn, 4,5—5,0% Cu, 4,2—4,7% Ni, 0,8—1,0% C, 0,1—0,4% B, 0,1—0,4% Si, 0,1—0,4% Cr, температура начала плавления 1070°С, полного расплавления 1100°С) вследствие дешевизны и хорошей технологичности применяют при пайке металлоконструкций из низкоуглеродистых сталей.

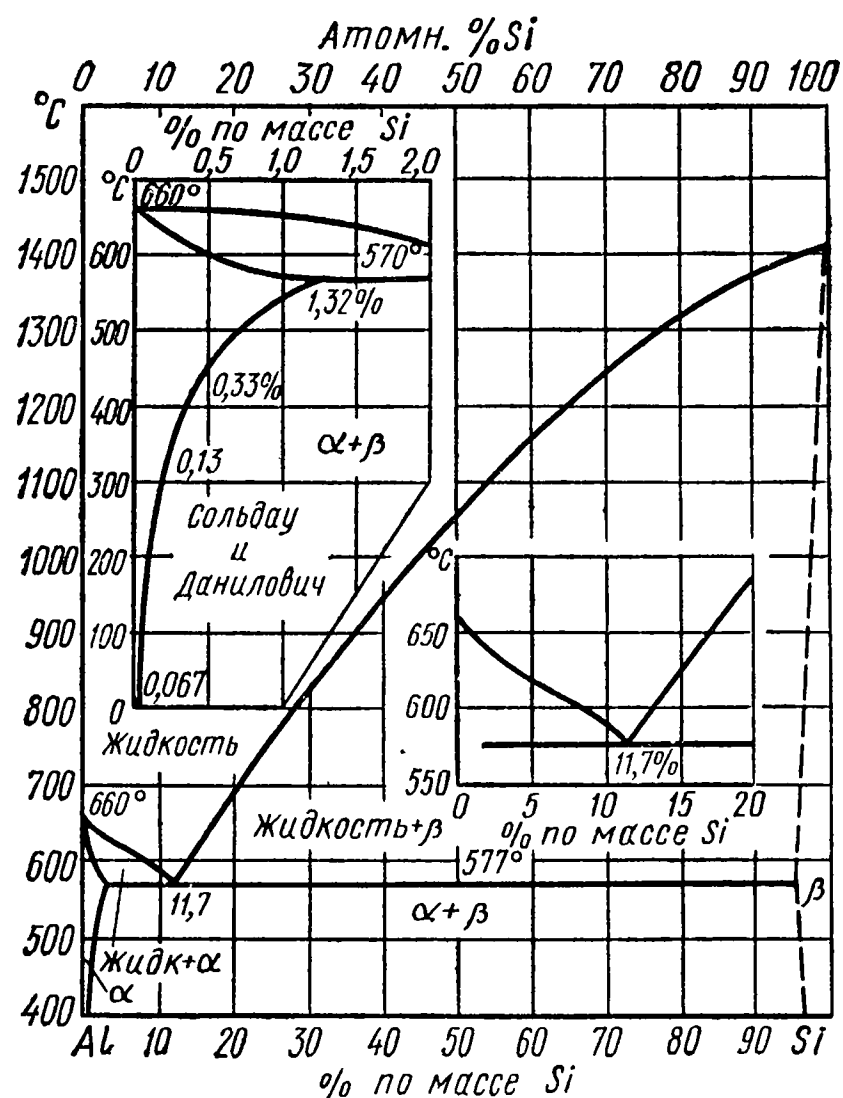


Рис. 17. Диаграмма состояния сплавов системы алюминий — кремний

АЛЮМИНИЕВЫЕ ПРИПОИ

Для пайки алюминиевых сплавов применяют припои на основе алюминия, цинка и олова. Припои на основе алюминия обеспечивают паяным соединениям наиболее высокие коррозионные свойства и механическую прочность. Однако припои на основе алюминия имеют сравнительно высокую температуру плавления, что затрудняет проведение пайки. В припои на алюминиевой основе вводят кремний, серебро, медь, цинк, кадмий и другие металлы [8, 13, 20]. Составы алюминиевых припоев, применяемых при пайке алюминиевых сплавов, приведены в табл. 48—50.

Наилучшей коррозионной стойкостью обладают припои алюминий — кремний (рис. 17). Применяют сплавы системы алюминий — кремний с содержанием 4—13% Si.

48. Алюминиевые припои, применяемые в Чехословакии (по ČSN)

Марка (стандарт)	Содержание элементов, % (Al — остальное)				Температура, °C		
	Si	Mn	Fe	Примеси, не более	начала плавле- ния	полного расплав- ления	пайки
Al-Si-5 (424232)	4,5—6,0	0,2	0,5	0,9	577	625	625—640
Al-Si-12 (424230)	11,5—13,5	0,3—0,5	0,5	0,7		600	600—630

49. Алюминиевые припои

Марка	Содержание элементов, % (Al — остальное)									Температура, °C	
	Zn	Cu	Si	Cd	Pb	Ag	Mn	Ge	При- меси, не бо- лее	начала плав- ления	полно- го рас- плав- ления
Германиевый № 1	—	—	4,5	—	—	—	—	31,5	0,5	460	480
Германиевый № 2	—	—	5,5	—	—	—	1,5	28,0	0,5	440	460
B65	21—26	20	3,5	—	—	—	—	—	0,5	490	500
34A	—	27—29	5,5—6,5	—	—	—	—	—	0,45	—	525
П550А	—	27	6	15	15	—	—	—	0,5	530	550
П575А	19—21	—	—	—	—	—	—	—	0,35	550	575
Силумин *	—	—	10—13	—	—	—	—	—	—	580	590
П590А	—	9—11	0,9—1,1	—	—	—	—	—	0,35	560	590
35А	—	20—22	6,5—7,5	—	—	—	—	—	0,45	—	540
—	—	—	—	—	—	40	—	—	—	430	535
—	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—	630
—	—	—	—	—	—	29,5	—	—	—	566	566
—	—	—	5	—	—	—	—	31,5	—	460	500
—	—	—	4	—	—	—	—	34,0	—	455	485
—	—	—	3,5	—	—	—	—	36,0	—	422	486
АЛ2	0,3	0,6	10—13	—	—	—	0,5	—	—	477	600

* ГОСТ 1521—63*

50. Алюминиевые припои, применяемые в США (по ASTM)

Марка	Содержание элементов, %								Температура, °C		
	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Cr	Al	начала плавления	полного рас- плавления	пайки
BA1Si-2	6,8—8,2	0,25	0,8	0,20	—	—	—	91,95—90,55	577	600	600—615
BA1Si-1	4,0—6,0	0,30	0,8	0,10	0,05	0,05	—	91,70—92,70	577	625	625—640
BA1Si-3	9,3—10,7	3,3—4,7	0,8	0,20	0,15	0,15	0,15	85,95—83,15	540	580	580—640
BA1Si-4	11,13	0,30	0,8	0,20	0,10	0,15	—	77,32	577	600	600—640

Обычно в качестве припоев используют эвтектический сплав с содержанием около 12% Si, имеющий температуру плавления 577° С. Эту температуру можно снизить, введя в припой медь. Наиболее низкая температура будет при 28% Cu, в этом случае образуется тройная эвтектика (припой марки 34А) с температурой плавления 525° С. Припой широко применяют в отечественной и зарубежной промышленности.

Для улучшения технологических свойств алюминиевых припоев и снижения температуры плавления дополнительно вводят цинк.

Все припой системы Al—Si—Cu пригодны для пайки алюминия и его сплавов, имеющих довольно высокую температуру плавления (АВ, АМц, АМг и др.), и не пригодны для пайки дюралюминия (Д1, Д16 и др.), не допускающего нагрева выше 505° С. Введение цинка и германия значительно снижает их температуру плавления и позволяет использовать для пайки дюралюминия.

МАГНИЕВЫЕ ПРИПОИ

Магниевые припои применяют главным образом для пайки магния и его сплавов.

В припой на основе магния вводят алюминий, медь, цинк, марганец. Эти припои сочетают с твердыми или жидкими флюсами, предохраняющими от воспламенения их в процессе пайки [13]. Составы некоторых магниевых припоев, применяемых при пайке магниевых сплавов, приведены в табл. 51.

51. Магниевые припои

Марка	Содержание элементов, %					Температура, °С	
	Mg	Al	Zn	Mn	Прочие	начала плавления	полного расплавления
П380Мг	72—75	2,0—2,5	23—25	—	—	—	560
П430Мг	84,0—86,25	0,75—1,0	13—15	—	—	—	600
AZ-92	88—90	8,3—9,7	1,7—2,3	0,1	0,002Be	595	600
AZ-125	83	12	5	—	—	560	625
—	52,5	21,5	0,30	0,20	25,50Cd	—	415
—	72,5	26	1,25	0,25	—	—	435
ВМг	87—89,7	8,3—9,7	1,7—2,3	≥0,10	0,3Si	435	564

52. Прочность паяных стыковых соединений на магниевых сплавах, паянных с флюсом Ф380Мг

Паяемый металл	Марка припоя	Предел прочности σ_v паяного соединения, кгс/мм ²
МА1	П430Мг	10,8
МА8		9,5
МА2	П380Мг	8,0
МА1		8,5

В процессе пайки магниевыми припоями при нагреве в печах или пламенем газовой горелки необходимо иметь избыток флюса, предохраняющего от окисления припой и паяный шов (от образования чернот в шве, снижающих прочность соединения, табл. 52).

ОЛОВЯННО-СВИНЦОВЫЕ ПРИПОИ

Олово и свинец в отдельности сравнительно редко применяют в качестве припоев.

Олово хотя и обладает высокой коррозионной стойкостью, однако паять им не всегда целесообразно, так как оно, так же как и свинец, имеет низкий предел ползучести, а при низких температурах чистое олово может претерпевать аллотропическое превращение, при котором, разрушаясь, переходит в серый порошок. Наибольшее применение нашли припои, содержащие 30—50% Sn.

Оловянно-свинцовые припои применяют в различных отраслях промышленности при низкотемпературной пайке стали, никеля, меди и ее сплавов. Они обладают высокими технологическими свойствами, пластичны и при выполнении пайки не требуют дорогостоящего оборудования и сложных способов пайки [20]. Пайку оловянно-свинцовыми припоями производят обычно при нагреве паяльником. В зависимости от содержания в припоях олова изменяются свойства и температура плавления (рис. 18). Минимальной температуры плавления ($183,3^{\circ}\text{C}$) достигают при содержании в сплаве $61,9\%$ Sn, этот припой имеет эвтектическую структуру, весьма пластичен, обладает высокими технологическими свойствами.

Введение в состав оловянно-свинцовых припоев сурьмы приводит к повышению предела ползучести, снижает склонность к старению и предотвращает аллотропические превращения олова, однако большое количество сурьмы ухудшает способность припоев смачивать поверхность паемых металлов. При содержании цинка и алюминия свыше $0,005\%$ снижается растекаемость припоя, ухудшается его взаимодей-

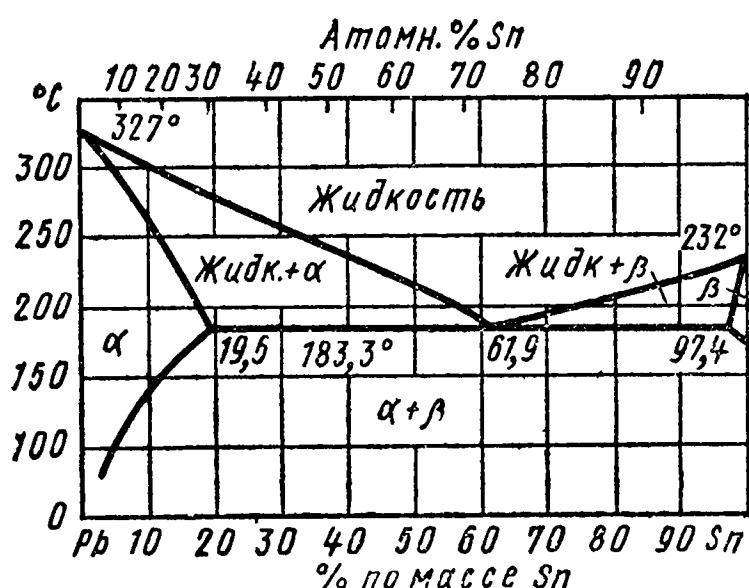


Рис. 18. Диаграмма состояния сплавов системы олово — свинец

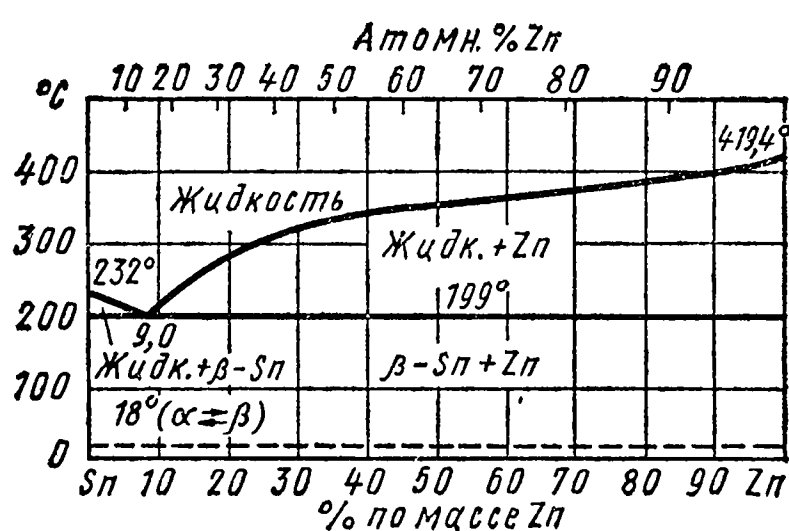


Рис. 19. Диаграмма состояния сплавов системы олово — цинк

вие с паемым металлом, появляется склонность к образованию трещин при затвердевании. Наиболее распространены оловянно-свинцовые припои, их свойства и назначение приведены в табл. 53—56.

Оловянно-свинцовые припои, а также и паяные соединения, выполненные ими, при охлаждении до низких температур меняют свои механические свойства — охрупчиваются. Пластичность припоев уменьшается, одновременно возрастает их прочность.

Паяные соединения, выполненные оловянно-свинцовыми припоями, имеют низкую коррозионную стойкость в условиях тропиков, а также при наличии конденсата; стойкость припоя понижается с повышением количества свинца. Для работы в этих условиях соединения необходимо защищать лакокрасочными покрытиями.

Оловянные припои легируют цинком, серебром, кадмием, алюминием. Небольшие присадки цинка в олово снижают температуру плавления до 199°C при 7% Zn (рис. 19).

Припои с содержанием $10\text{—}40\%$ Zn применяют для пайки алюминия ультразвуком или абразивным методом. Введение серебра в оловянно-цинковые припои измельчает зерно и повышает коррозионную стойкость [13].

Припои на основе олова, содержащие серебро, сурьму, медь (ВПр6, ВПр9), обладают высокой коррозионной стойкостью и применяются для пайки медных, латунных электропроводов (электрооборудования), работающих во всех климатических условиях без защиты соединений лакокрасочными покрытиями (табл. 57).

Оловянно-свинцовые припои, применяемые в зарубежной практике, приведены в табл. 58—61.

53. Химический состав оловянно-свинцовых припоев и область их применения (ГОСТ 1499—70*)

Марка	Химический состав, % (Pb — остальное)		Назначение	
	Sn	Sb		
Бессурьмянистые				
ПОС 90	89—91	—	Лужение и пайка внутренних швов пищевой посуды и медицинской аппаратуры	
ПОС 61	60—62	—	Лужение и пайка электро- и радиоаппаратуры, печатных схем, точных приборов с высокогерметичными швами, где недопустим перегрев	
ПОС 40	39—41	—	Лужение и пайка электроаппаратуры, деталей из оцинкованного железа с герметичными швами	
ПОС 10	9—11	—	Лужение и пайка контактных поверхностей электрических аппаратов, приборов, реле	
ПОС 61М*	60—62	—	Лужение и пайка медной проволоки в кабельной промышленности и ювелирной технике	
ПОСК 50-18**	49—51	—	Пайка деталей, чувствительных к перегреву, и металлизированной керамики	
Малосурьмянистые				
ПОССу 61-0,5	60—62	0,2—0,5	Лужение и пайка электроаппаратуры обмоток электрических машин, оцинкованных радиодеталей	
ПОССу 50-0,5	49—51		Лужение и пайка авиационных радиаторов; пайка пищевой посуды с последующим лужением пищевым оловом	
ПОССу 40-0,5	39—41		Лужение и пайка белой жести, обмоток электрических машин, пайка оцинкованных деталей	
ПОССу 35-0,5	34—36		Лужение и пайка свинцовых кабельных оболочек электротехнических изделий	
ПОССу 30-0,5	29—31		Лужение и пайка листового цинка, радиаторов	
ПОССу 25-0,5	24—26		Лужение и пайка радиаторов	
ПОССу 18-05	17—18		Лужение и пайка трубок теплообменников электроламп	
Сурьмянистые				
ПОССу 95-5	94—96	4,0—5,0	Пайка в электропромышленности; пайка трубопроводов	
ПОССу 40-2	39—41	1,5—2,0	Лужение и пайка холодильных устройств, припой широкого назначения	
ПОССу 35-2	34—36		Пайка свинцовых труб, абразивная пайка	
ПОССу 30-2	29—31	1,5—2,0	Лужение и пайка в холодильном аппаростроении; абразивная пайка	
ПОССу 25-2	24—26		Пайка в автомобильной промышленности	
ПОССу 18-2	17—18		2,0—3,0	Лужение и пайка в электроламповом производстве
ПОССу 15-2	14—15			
ПОССу 10-2	9—10			
ПОССу 8-3	7—8			
ПОССу 5-1	4—5	0,5—1,0	Лужение и пайка деталей, работающих при повышенных температурах	
ПОССу 4-6	3—4	5,0—6,0	Пайка белой жести, латуни и меди	

* Содержит 1,5—2,0% Cu. ** Содержит 17—19% Cd.

Примечания: 1. Примеси, % не более: бессурьмянистые: ПОС 90: Sb $\geq$ 0,05; Cu $\geq$ 0,05; Bi $\geq$ 0,1; As $\geq$ 0,02; Ni $\geq$ 0,02; S $\geq$ 0,02; Zn $\geq$ 0,002; Al $\geq$ 0,002; Fe $\geq$ 0,02; ПОС 61, ПОС 40, ПОС 10: Sb $\geq$ 0,05; Cu $\geq$ 0,05; Bi $\geq$ 0,1; As $\geq$ 0,03; Ni $\geq$ 0,02; Fe $\geq$ 0,02; Zn $\geq$ 0,002; Al $\geq$ 0,002; S $\geq$ 0,02; ПОС 61М, ПОСК 50-18: Sb $\geq$ 0,2; Cu $\geq$ 0,08; Bi $\geq$ 0,1; As $\geq$ 0,02; Ni $\geq$ 0,02; Zn $\geq$ 0,002; Al $\geq$ 0,002; S $\geq$ 0,02; Fe $\geq$ 0,02. Малосурьмянистые: Cu $\geq$ 0,08; Bi $\geq$ 0,1; As $\geq$ 0,03; Fe $\geq$ 0,02; Ni $\geq$ 0,02; S $\geq$ 0,02; Zn $\geq$ 0,02; Al $\geq$ 0,002. Сурьмянистые: Cu $\geq$ 0,10; Bi $\geq$ 0,2; As $\geq$ 0,05; Fe $\geq$ 0,02; Ni $\geq$ 0,08; S $\geq$ 0,02; Zn $\geq$ 0,002; Al $\geq$ 0,002; ПОССу 95-5: Cu $\geq$ 0,08; Bi $\geq$ 0,1; As $\geq$ 0,05; Fe $\geq$ 0,02; Ni $\geq$ 0,02; S $\geq$ 0,02; Zn $\geq$ 0,02; Al $\geq$ 0,002; Pb $\geq$ 0,07.
2. Малосурьмянистые припои не рекомендуются для пайки цинковых и оцинкованных деталей.

54. Механические свойства оловянно-свинцовых припоев при разных температурах

Марка	Темпе- ра- тура испыта- ния, °C	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	$\tau_{ср}$, кгс/мм ²	Марка	Темпе- ра ис- пытания, °C	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	$\tau_{ср}$, кгс/мм ²
ПОС 40	85	2,7	60	—	ПОССу 18-0,5	—60	7,9	16	—
	20	3,6	52	3,9		—96	10,8	10	6,9
	—30	9,5	22	—		—183	11,6	4	9,0
	—50	—	—	6,4		—196	12,0	2	9,1
	—60	11,8	16	—		85	2,8	—	—
	—96	12,6	14	8,0		20	3,6	50	3,6
	—183	13,4	3	9,6		—30	6,5	—	—
	—196	13,4	2	10,0		—50	—	—	5,3
ПОССу 30-0,5	85	2,6	50	—		—60	6,5	5	—
	20	3,6	45	3,5		—96	7,4	4	6,6
	—30	7,8	22	—		—183	10,1	3	8,0
	—50	—	—	5,8		—196	11,1	2	8,2

55. Предел прочности ($\tau_{ср}$) паяных соединений, выполненных оловянно-свинцовыми припоями (кгс/мм²)

Паяемый металл	Марка припоя	Температура испытания, °C					
		—196	—183	—96	—50	20	85
Л63	ПОС 40	—	6,0	3,8	3,45	2,4	1,4
Сталь 20	ПОС 40	5,5	5,3	5,2	4,9	2,7	2,2
12Х18Н10Т	ПОС 40	4,0	3,9	3,3	2,7	2,3	2,0
Л63	ПОССу 30-0,5	—	7,3	6,0	3,4	3,2	1,4
Сталь 20	ПОССу 30-0,5	5,3	4,9	4,6	3,7	3,3	2,0
12Х18Н10Т	ПОССу 30-0,5	5,05	2,2	3,7	2,3	2,2	1,8
Л63	ПОССу 18-0,5	6,0	5,2	4,05	3,7	2,7	1,4
Сталь 20	ПОССу 18-0,5	6,1	5,6	4,8	4,4	2,8	1,7

56. Физико-механические свойства оловянно-свинцовых припоев

Марка	Температура °C плавления		γ , г/см ³	$\rho \cdot 10^8$, Ом · мм ² м	λ , ккал/(см · с · °C)	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	a_K , кгс · м/см ²	HВ
	начала плавле- ния	полного расплав- ления							
ПОС 90	183	220	7,6	12,0	130	4,9	40	4,2	15,4
ПОС 61	183	190	8,5	13,9	120	4,3	46	3,9	14,0
ПОС 40	183	238	9,3	15,9	100	3,8	52	4,0	12,5
ПОС 10	268	299	10,8	20,0	84	3,2	44	3,2	12,5
ПОС 61М	183	192	8,5	14,3	117	4,5	40	1,1	14,9
ПОСК 50-18	142	145	8,8	13,3	130	4,0	40	4,9	14,0
ПОССу 61-0,5	183	189	8,5	14,0	120	4,5	35	3,7	13,5
ПОССу 50-0,5	183	216	8,9	14,9	112	3,8	62	4,4	13,2
ПОССу 40-0,5	183	235	9,3	16,9	100	4,0	50	4,0	13,0
ПОССу 35-0,5	183	245	9,5	17,2	100	3,8	47	3,9	13,3
ПОССу 30-0,5	183	255	9,7	17,9	90	3,6	45	3,9	13,2
ПОССу 25-0,5	183	266	10,0	18,2	90	3,6	45	3,9	13,6
ПОССу 18-0,5	183	277	10,2	19,8	84	3,6	—	3,6	—
ПОССу 95-5	234	240	7,3	14,5	110	4,0	46	5,5	18,0
ПОССу 40-2	185	229	9,2	17,2	100	4,3	48	2,8	14,2
ПОССу 35-2	185	243	9,4	17,9	90	4,0	40	2,6	—
ПОССу 30-2	185	250	9,6	18,2	90	4,0	40	2,5	—
ПОССу 25-2	185	260	9,8	18,5	90	3,8	35	2,4	—
ПОССу 18-2	186	270	10,1	20,6	81	3,6	35	1,9	11,7
ПОССу 15-2	184	275	10,3	20,8	80	3,6	35	1,9	12,0
ПОССу 10-2	268	285	10,7	20,8	80	3,5	30	1,9	10,8
ПОССу 8-3	240	290	10,5	20,7	81	4,0	43	1,7	12,8
ПОССу 5-1	275	308	11,2	20,0	84	3,3	40	2,8	10,7
ПОССу 4-6	244	270	10,7	20,8	80	6,5	15	0,8	17,3

57. Оловянные припой с цинком, серебром, сурьмой, медью и кадмием

Марка	Содержание элементов, %							Температура, °C	
	Sn	Zn	Ag	Sb	Cu	Cd	Примеси, не более	начала плавления	полного расплавления
П200А	89—91	9—11	—	—	—	—	0,35	199	210
П250А	79—81	19—21	—	—	—	—	0,35	199	250
Sn 70 Zn	69—71	29—31	—	—	—	—	0,35	200	315
Sn 60 Zn	59—61	39—41	—	—	—	—	0,35	200	345
ВПр6	83—86	—	7,5—	6,0—	—	—	0,5	235	250
(ПСрМО5)			8,5	8,0					
ВПр9	90,8—	—	1,5—	0,8—	1,5—	—	0,5	215	240
(ПСрОСy8)	93,2		5,5	1,2	2,5				
П150А	37,5—	3,5—4,1	—	—	—	56,7—	0,35	150	165
	39,5					58,7			
4223-1	70—80	20—30	1—2	—	—	—	0,3	260	280
4223-2	50—65	40—44	2—3	2—4	—	—	0,3	320	350
ВЭ49	55	43,5	1,5	—	—	—	0,3	190	400
П170А	78—80	—	0,9—	—	—	19—21	0,3	170	175
			1,1						
ПОССр2 *	57,8—	—	1,9—	≤ 0,3	—	—	0,35	169	173
	59,8		2,1						
ПОСр3	96,7—	—	2,7—	—	—	—	0,3	220	220
	97,3		3,3						

* Содержит 37,5—39,5% Pb.

58. Оловянно-свинцовые припой, применяемые в Чехословакии (по ČSN)

Марка	Содержание элементов, % (Pb — остальное)		Температура пайки, °C
	Sn	Sb	
Sn99—Pb	99,6	—	240
Sn90—Pb	89—91	—	222—270
Sn60—Pb	59—61	≤ 0,5	190—240
Sn50—Pb	49—51	≤ 0,5	220—270
Sn40—Pb	39—41	≤ 2,0	230—280
Sn30—Pb	29—31	≤ 2,0	250—300
Sn18—Pb	17—19	≤ 2,5	270—320
Sn8—Pb	7—9	≤ 2,5	310—360
Sn4—Pb	3—4	≤ 2,4	320—370

59. Оловянно-свинцовые припой (по DIN 1730)

Марка	Содержание элементов, % (Pb — остальное)		Температура пайки, °C
	Sn	Sb	
LSn98	97,5—98,5	—	230
LSn60	59,5—60,5	≤ 3,2	200
LSn50	49,5—50,5	≤ 3,3	230
LSn40	39,5—40,5	≤ 2,7	230
LSn35	34,5—35,5	≤ 2,3	250
LSn33	32,5—33,5	≤ 2,2	250
LSn30	29,5—30,5	≤ 2,0	250
LSn25	24,5—25,5	≤ 1,7	270
LSn8	7,5—8,5	≤ 0,6	300

60. Оловянно-свинцовые припой, применяемые в Англии (по B, S, 219, 1959)

Марка	Содержание элементов, % (Pb — остальное)		Температура полного расплавления, °C	Марка	Содержание элементов, % (Pb — остальное)		Температура полного расплавления, °C
	Sn	Sb			Sn	Sb	
A	64—65	≤ 0,6	185	C	30—40	2,0—2,4	227
K	59—60	≤ 0,5	188	H	34—35	≤ 0,3	255
F	40—50	≤ 0,5	212	J	29—30	≤ 0,3	255
B	49—50	2,5—3,0	204	D	21—30	1,0—1,7	248
R	44—45	≤ 0,4	224	V	19—20	≤ 0,2	277
M	44—45	2,3—2,7	215	N	18—18,5	0,75—1,0	275
G	39—40	≤ 0,4	234				

61. Оловянно-свинцовые припои, применяемые в США (по ASTM)

Марка	Содержание элемен-тов, % (Pb — остальное)		Темпера-тура полного расплав-ления, °C	Марка	Содержание элемен-тов, % (Pb — остальное)		Темпера-тура полного расплав-ления, °C
	Sn	Sb			Sn	Sb	
70A 70B	70	$\leq 0,12$ $\leq 0,50$	192	50B 50B	50	$\leq 0,12$ $\leq 0,50$	216
60A 60B	60	$\leq 0,12$ $\leq 0,50$	190	45A 45B	45	$\leq 0,12$ $\leq 0,50$	227

СВИНЦОВЫЕ ПРИПОИ

Чистый свинец в качестве припоя малопригоден, он со многими металлами (Fe, Cu, Co, Ni, Al, Zn) не дает паяные соединения достаточной прочности. Применяют припои на основе свинца с введением в их состав висмута (рис. 20), кадмия (рис. 21), олова, серебра.

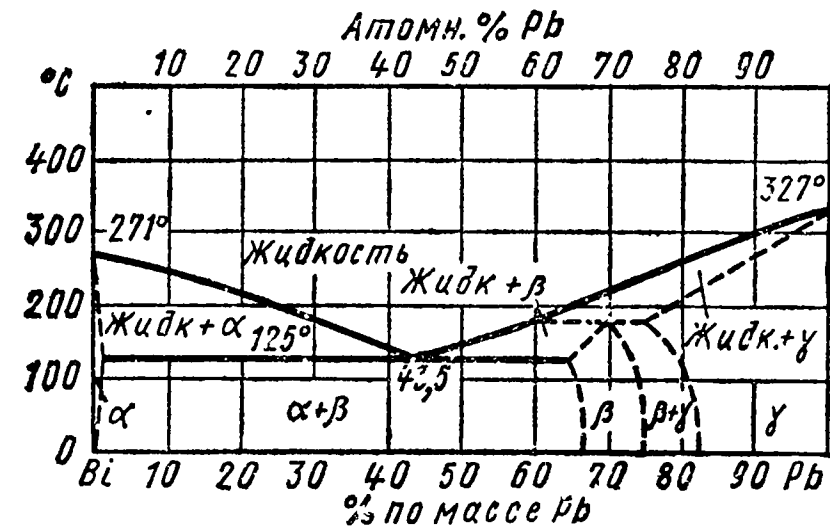


Рис. 20. Диаграмма состояния сплавов системы свинец — висмут

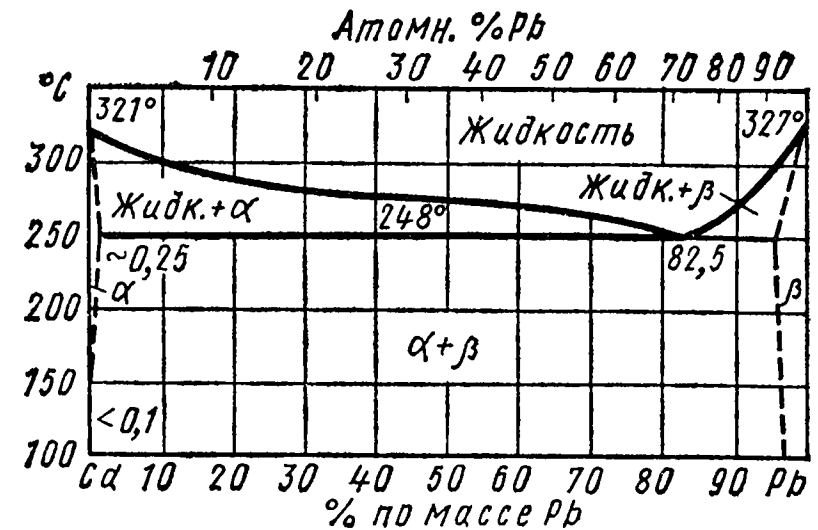


Рис. 21. Диаграмма состояния сплавов системы свинец — кадмий

Висмут и кадмий понижают температуру плавления сплава и способствуют получению более твердых и коррозионностойких припоев (табл. 62).

62. Свинцовые припои с висмутом, кадмием и оловом

Марка	Содержание элементов, % (Pb — остальное)			Примеси, не более	Температура, °C	
	Sn	Cd	Bi		начала плавления	полного расплавле- ния
—	23	—	11	—	—	230
ПОСК50	49,0—51,0	17,0—19,0	—	0,35	142	145
ПОСВ33	32,4—34,4	—	32,3—34,3	0,3	120	130
—	10	2	—	—	—	275
—	3	22	—	—	—	237
—	10	5	—	—	—	260
—	10	10	—	—	—	253
—	25	—	15	—	—	210
—	22	—	27	—	—	150
—	43	—	14	—	—	163
—	37	—	21	—	—	152
ПОСВ50	24,5—25,5	—	49,0—51,0	0,3	90	92

63. Припои на основе свинца с серебром

Марка	Содержание элементов, %						Температура, °C	
	Pb	Ag	Sn	Другие элементы	При- меси, не более	γ, г/см³	начала плавле- ния	полного расплав- ления
ПСр 3 *	96—98	2,7—3,3	—	—	0,5	11,3	300	505
ПСр 2 5 *	91—93	2,2—2,8	5,0—6,0	—	0,5	11,0	295	305
ПСр 2 *	61 5—61,5	1,7—2,3	29,0—31,0	4,5—5,5 Cd	0,5	9,6	225	235
ПСр 1,5 *	82—85	1,2—1,8	14—16	—	0,5	10,4	265	270
—	93,5	1,5	5,0	—	—	—	296	301
—	97,5	1,5	1,0	—	—	—	309	310
—	98—99	5—6	1 2	—	—	—	302	304
ВПр 12 (ПСр 65—40)	Основа	4,5—5,5	39—41	1,5—5,5 Cu 1,3—1,7 Sb 0,1—0,2 P	0,5	9,38	220	300

* ГОСТ 19738—74.

Широкое применение получили свинцовые припои с серебром (рис. 22) до 3% : эти припои обладают высокой пластичностью и хорошими технологическими свойствами, имеют бóльшую теплостойкость, чем оловянно-свинцовые припои, их используют при пайке меди и латуни паяльником (табл. 63).

Свинцовые припои обладают низкой сопротивляемостью ползучести при повышенных температурах. При создании припоев в их состав вводят элементы, упрочняющие свинец (Sb, Na, Zn, Ag). Среди свинцовых припоев припой СК-7 (состава 6—10% Cd, 0,5—1,5% Zn, 1,0—1,5% Sb, до 0,3% Na и свинец — остальное) с температурой плавления 270 °C обладает наиболее высоким пределом ползучести.

Припой на свинцовой основе состава 7,5% Ag, 4,5% Sn, 0 15% Ni и 3,8% Cu обладает высокой хладостойкостью и может применяться для пайки изделий криогенной техники.

Паяные соединения на меди и латуни, выполненные припоями на основе свинца, обладают низкой коррозионной стойкостью в условиях повышенной влажности (тропиков) и при наличии конденсируемой влаги можно эксплуатировать только в случае защиты их лакокрасочными покрытиями.

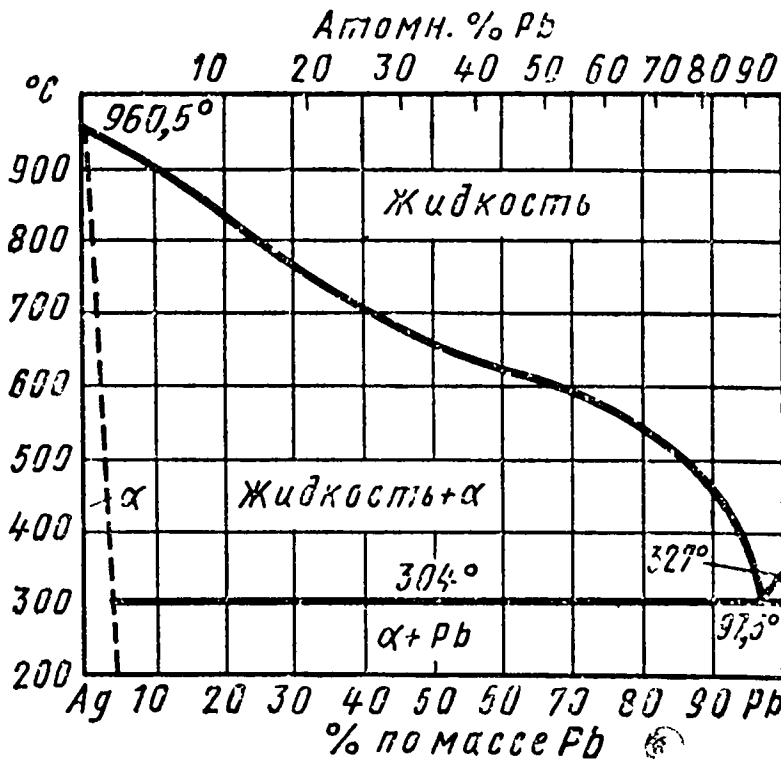


Рис. 22. Диаграмма состояния сплавов системы свинец — серебро

ИНДИЕВЫЕ ПРИПОИ

Индий является мягким и пластичным металлом, плавится при 155 °C. Индий относится к числу благородных металлов. стоек к окислению, обладает хорошей электро- и теплопроводностью, низким пределом прочности при растяжении, высокой пластичностью (относительное удлинение 61%).

Индий как припой для пайки употребляется сравнительно редко, однако припои на его основе при пайке вакуумных соединений, стеклянных и кварцевых изделий, узлов криогенной техники нашли широкое применение. Припои обладают высокой

коррозионной стойкостью в щелочных растворах. Индиевые припои применяют при пайке полупроводниковых материалов с малым переходным сопротивлением шва [12]. Благодаря высокой пластичности индиевых припоев и хорошей смачивающей способности их металлов и неметаллических материалов представляется возможность производить пайку материалов с различными коэффициентами линейного расширения [15].

64. Индиевые многокомпонентные припои

Содержание элементов, %								Температура полного рас- плавания, °C
In	Cd	Pb	Sn	Ag	Zn	Ti	Bi	
25	—	75	—	—	—	—	—	231
80	—	15	—	5	—	—	—	156
97,2	—	—	—	—	2,8	—	—	143
42,8	—	7,8	46,8	—	—	2,6	—	121
50	—	—	50	—	—	—	—	120
44,2	—	—	46,8	—	—	9,0	—	117
74	24,25	—	—	—	1,75	—	—	116
48,2	—	4	46	—	1,8	—	—	108
44	14	—	42	—	—	—	—	93
44,2	13,6	—	41,4	—	—	0,8	—	90
66	—	—	—	—	—	—	34	72
74	26	—	—	—	—	—	—	123
97	—	—	—	3	—	—	—	141

Химический состав индиевых припоев приведен в табл. 64.

Эвтектический индиевый припой состава 74% In, 26% Cd (рис. 23) хорошо растекается при пайке германиевых элементов и полупроводниковых материалов.

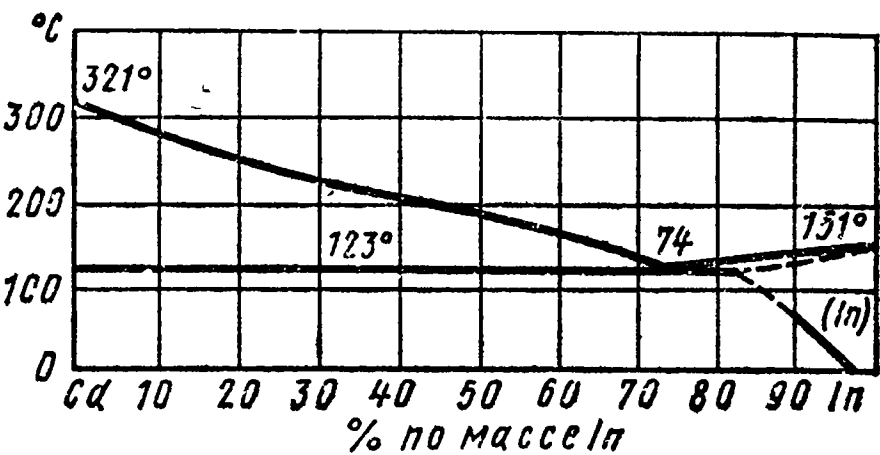


Рис. 23. Диаграмма состояния сплавов системы индий — кадмий

ЦИНКОВЫЕ, КАДМИЕВЫЕ И ВИСМУТОВЫЕ ПРИПОИ

Цинковые припои. Для пайки изделий из алюминиевых и цинковых сплавов применяют припои на основе цинка с оловом. При содержании олова более 30% они обладают наиболее высокой прочностью и достаточной пластичностью, технологичны

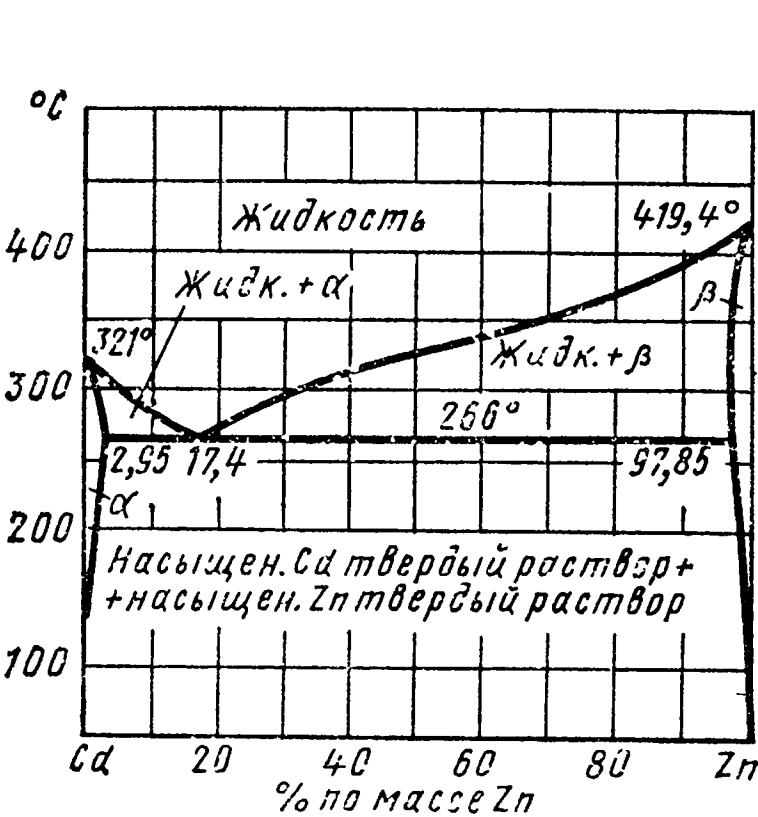


Рис. 24. Диаграмма состояния сплавов системы кадмий — цинк

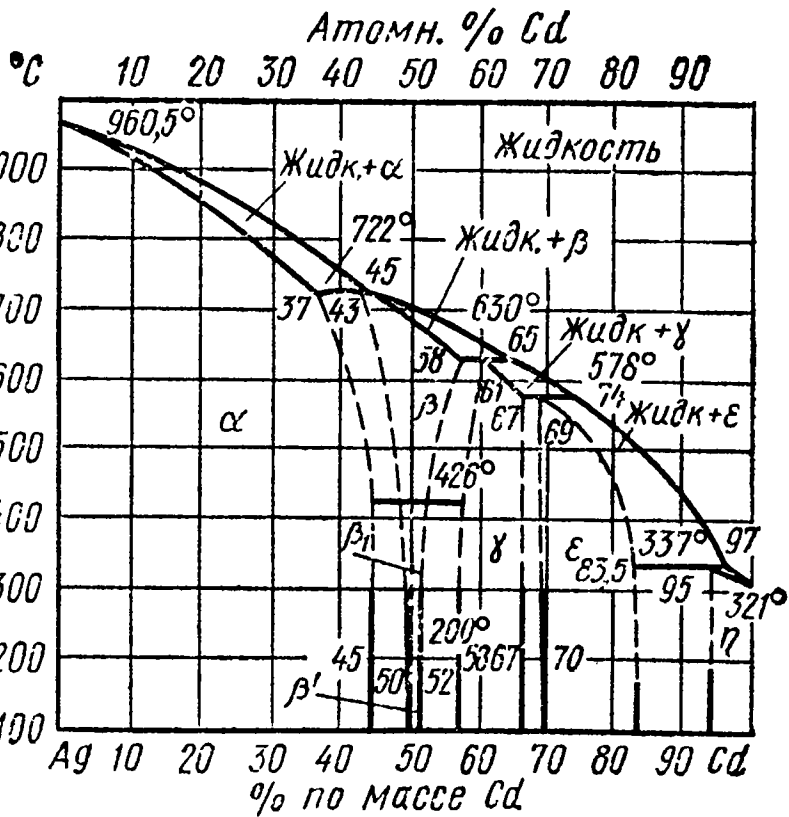


Рис. 25. Диаграмма состояния сплавов системы кадмий — серебро

при пайке сплавов алюминия и цинка, однако коррозионная стойкость этих соединений во влажной атмосфере низкая и требует защиты лакокрасочными покрытиями [11]. Для обеспечения технологических свойств в состав цинковых припоев вводят алюминий, кадмий и другие металлы (табл. 65) [10].

Цинковые припои, используемые в зарубежной практике, приведены в табл. 66.

Кадмиевые припои. Кадмий как припой находит ограниченное применение. Используют двойные или многокомпонентные сплавы кадмия с цинком (рис. 24), серебром (рис. 25), оловом, магнием, никелем, свинцом и индием для пайки меди, латуни, алюминия и других металлов (табл. 67).

Изделия, работающие до температуры 280—300 °С, подвергают пайке кадмис-выми припоями, содержащими магний и никель; для ультразвуковой пайки и луже-ния алюминия используют кадмиевые припои с оловом. Припой с серебром обес-печивают теплостойкость соединений на меди до 250 °С, добавка в эти припой цинка повышает теплостойкость до 300 °С. Механические свойства некоторых кадмиевых припоев приведены в табл. 68.

65. Цинковые припои

Марка	Содержание элементов, % (Zn — остальное)								Температура, °С	
	Al	Cu	Cd	Sn	Ag	Si	Pb	Mn	начала плавле- ния	полного расплав- ления
В63	8	3—5	—	0,5	—	—	1,5	—	360	420
ПЦАМ-65	19—20	14—15	—	—	—	—	—	—	330	420
П300А	—	—	39—41	—	—	—	—	—	266	310
П425А	19—21	14—16	—	—	—	—	—	—	415	425
П480А	19—21	14—16	—	—	—	—	—	0,5—0,7	480	490
Мосэнерго «Б»	—	—	25	35	—	—	—	—	250	300
ПЦАМКд-45	13,5	10	31,5	—	—	—	—	—	320	340
ПЦАМКд-40	11,5	8,5	40,0	—	—	—	—	—	290	310
ПСр5АКЦ	2—3	—	—	—	4—5	≤ 0,15	—	—	400	420
ПАКЦ	19—20	—	—	—	—	≤ 0,15	—	—	420	450
ПЦАМ3М	8	5	—	0,6	—	—	1,4	—	360	410
—	—	—	40	—	—	—	—	—	266	335
—	—	—	20	15	—	—	—	—	163	346
—	—	—	—	40	—	—	—	—	199	370
Мосэнерго «А»	—	1,5	—	40	—	—	—	—	200	370
—	7	4	—	0,5	—	—	0,5	—	370	380
—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	380
—	19—21	4—5	—	—	—	—	—	—	377	395
48 *	11	7	—	—	—	—	—	—	385	389

* Содержит 0,5% Со.

66. Цинковые припои, применяемые в зарубежной промышленности

Страна	Марка	Содержание элементов, % (Zn — остальное)					Темпера- тура пайки, °С
		Cu	Al	Sn	Cd	Mg	
Англия	—	6,5	6,0	5,0	5	—	300
ЧССР	Zn80Sn	—	—	18,0	—	—	390—440
ГДР	LZnCd40	—	≤ 4	—	35—45	—	330—350
	LZnAl15	—	15	—	—	—	390—430
	LZnSn	—	—	39	—	—	355—400
	LZnCd	—	39	—	4	—	320
США	—	2	5	5	—	—	400
Япония	—	2,6—3,7	3,7—4,8	4,2—8,5	—	0,03—0,05	350—400

67. Химический состав кадмиевых припоев

Марка	Содержание элементов, % (Cd — остальное)							Температура полного расплавления, °C
	Zn	Ag	Mg	Ni	Sn	Al	Cu	
K-1	0,8—1,7	2,5—3,5	—	—	—	—	—	325
Cd + 5% Ag	—	5,0	—	—	—	—	—	393
—	16,0	5,0	—	—	—	—	—	285
—	15,0	15,0	—	—	—	—	—	400
K83-17	17,4	—	—	—	—	—	—	266
LCdZn20	17—25	—	—	—	—	—	—	280
—	40	—	—	—	—	—	—	310
K-3	—	2,5—3,5	0,03—0,08	—	—	—	—	330
ПСр 3Кд*	0,5—1,5	2,5—3,5	—	—	—	—	—	325
—	—	11—13	0,1—0,2	—	—	—	—	420
ПСр 8КЦН	5—7	7—9	—	1,5—2,5	—	—	—	370
ПСр 5КЦН	1,5—2,5	4—6	—	1,5—2,5	—	—	—	355
—	30	—	—	—	3—5	—	—	294
—	3,8	—	—	—	38,5	—	—	150
—	3,5	—	—	—	45	—	—	170
—	20	—	—	—	30	—	—	277
ПЦАМКд 33	32—34	—	—	—	—	9,5	7,0	260
ПЦАМКд 40	39—41	—	—	—	—	11—12	8—9	310
ПЦАМКд 45	45	—	—	—	—	13,5	9,5—10,5	340
—	50	—	—	—	—	—	—	320
—	30	—	—	—	—	—	—	332

* ГОСТ 19738—74.

68. Механические свойства кадмиевых припоев в литом состоянии

Марка	Температура испытаний, °C									
	—60		20		150		200		250	
	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	σ_B , кгс/мм ²	δ , %
K-1	—	—	13,5	—	—	—	3,5	—	0,8	—
K-3	—	—	11,5	40,0	—	—	4,1	—	3,2	—
K83-17	—	—	12,0	25,8	—	—	—	—	—	—
ПСр 5КЦН	15	0,4	15,5	3,5	9	1	4,5	17	4	3,2
ПСр 8КЦН	19	1,0	15,0	3,0	—	—	4,0	4	—	—
Cd + 5% Ag	—	—	11,3	31,3	2,76	93,7	1,8	93,7	3,2	21,9

На медных сплавах кадмиевые припои обеспечивают прочность паяных соединений $\tau_{ср}$ 11—20 кгс/мм².

Висмутовые припои. Висмут — металл, имеющий низкую пластичность и прочность, обладает склонностью к трещинообразованию при затвердевании, поэтому он не используется как припой. Однако сплавы с большим содержанием висмута

применяют в качестве припоев с температурой плавления 46—167 °С. Для этих припоев характерно увеличение в объеме при переходе из жидкого состояния в твердое и при дальнейшем охлаждении.

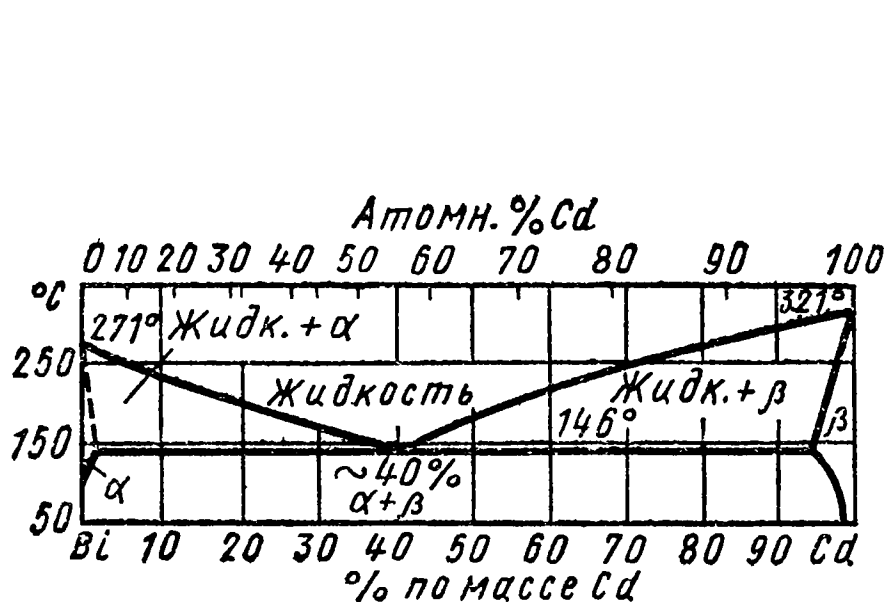


Рис. 26. Диаграмма состояния сплавов системы висмут — кадмий

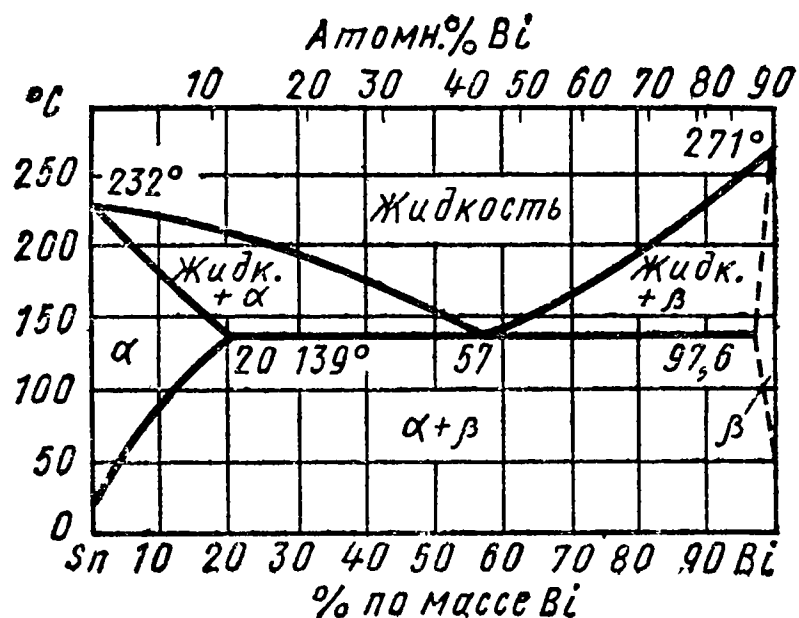


Рис. 27. Диаграмма состояния сплавов системы висмут — олово

Висмутовые припои плохо смачивают железо и конструкционные стали. Для улучшения смачиваемости эти металлы оцинковывают, лудят оловянно-свинцовыми припоями или покрывают гальванической медью. Чаще всего висмутовыми припоями паяют медь и латунь в случае, когда не допускается высокий нагрев паяемого

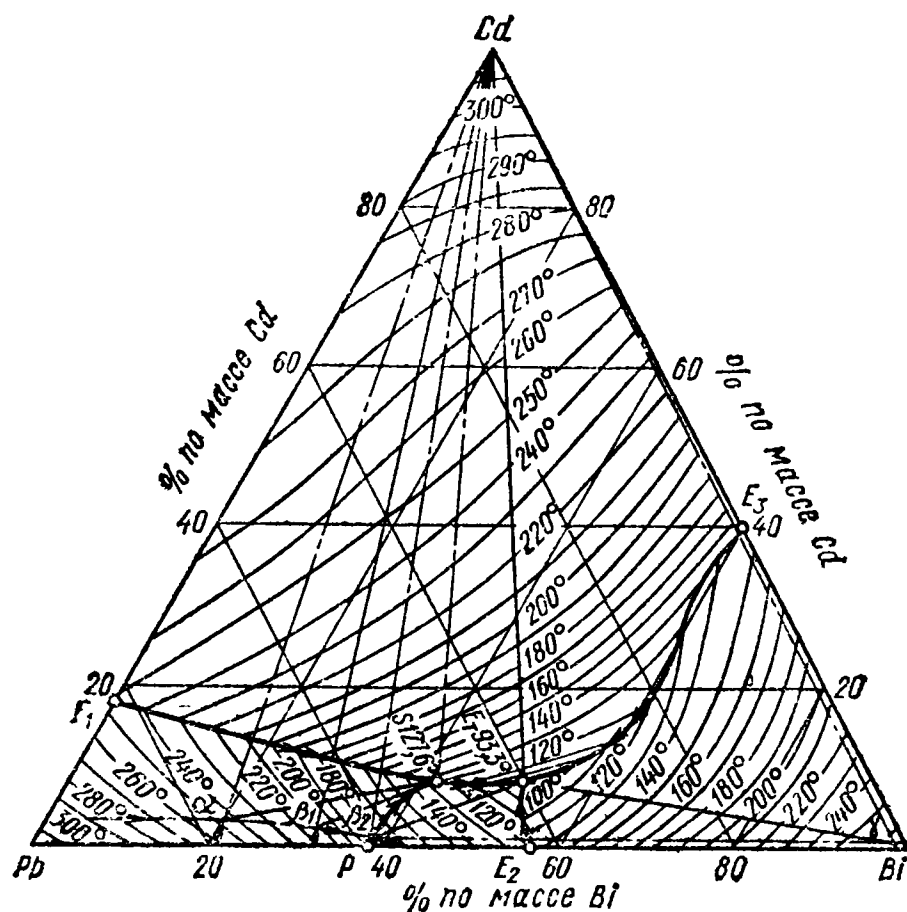


Рис. 28. Диаграмма состояния сплавов системы висмут — свинец — кадмий

металла. В висмутовые припои вводят кадмий, свинец, олово, цинк, индий, таллий для снижения температуры и обеспечения необходимых свойств (рис. 26—28)

Химический состав некоторых легкоплавких висмутовых припоев приведен в табл. 69.

69. Висмутовые припой

Марка	Содержание элементов, % (Bi — остальное)					Температура полного расплавления, °C
	Pb	Sn	Cd	In	Tl	
— —	22,4 18,0	10,8 12,0	8,2 —	18 21,0	— —	26 58
Сплав Вуда	21,5—25,3	12,0—13,0	12,0—13,0	—	—	60
Сплав Арсенваля	45,1	9,6	—	—	—	79
— —	35,1 33,3	20,1 —	9,5 —	— —	— 11,5	80 91
Сплав Розе	25,0	25,0	—	—	—	94
— — — — —	27,5 22,0 — 22,0 14,8	13,9 15,9 26,0 22,0 25,8	— — 20,0 — —	— — — — —	16,6 — — — —	93 100 103 110 114
Сплав Липовица	26,67	13,33	10,0	—	—	—
— — — — —	— — — 8,3 31,3	— 32,6 — — —	30,0 — 38,5 30,3 —	— — — — —	10 6,2 21,1 21,2 25	123 128 144 149 167

ГАЛЛИЕВЫЕ И ТИТАНОВЫЕ ПРИПОИ

Галлиевые припой. Галлий имеет низкую температуру плавления (29,8 °C), хорошо смачивает металлы, обладает необычайно большой способностью проникать по границе зерен металлов (Sn, In, Cd, Zn, Pb, Al), образуя эвтектику (рис. 29—32). При пайке, например, алюминия припоями с большим содержанием галлия, последний проникает по границам зерен, что значительно охрупчивает паяное соединение при комнатной и более высоких температурах [12]. Подобное действие оказывают галлиевые припой также и при пайке материалов, значительно растворяющих их и не образующих с ними легкоплавкой эвтектики.

Некоторые низкотемпературные галлиевые припой приведены в табл. 70.

Титановые припой. Титан относится к числу активных металлов, имеет высокую температуру плавления (1668° C), сравнительно малую плотность, достаточно высокую удельную прочность и хорошие геттерные свойства.

При нагреве выше 400° C на воздухе титан и его сплавы активно окисляются, в среде водорода и азота титан образует гидриды или нитриды [16].

Припой с титаном обладают повышенной активностью и способностью смачивать поверхности тугоплавких металлов и металлов, покрытых окислами, а также минералокерамику; их применяют для пайки тугоплавких металлов, титана и его сплавов.

Пайку производят в инертных газах (аргон, гелий), не содержащих кислород, азот и водород, или в вакууме с разрежением 10⁻² —10⁻⁵ мм рт. ст.

Некоторые припой с титаном приведены в табл. 71.

Припои на основе титана представляют собой эвтектики титана с медью, никелем, кобальтом и другими металлами, они весьма хрупки, их применяют в виде порошка или паст.

Хрупкость припоев, содержащих титан, препятствует изготовлению из них ленты (полос), фольги или проволоки, что ограничивает область их применения.

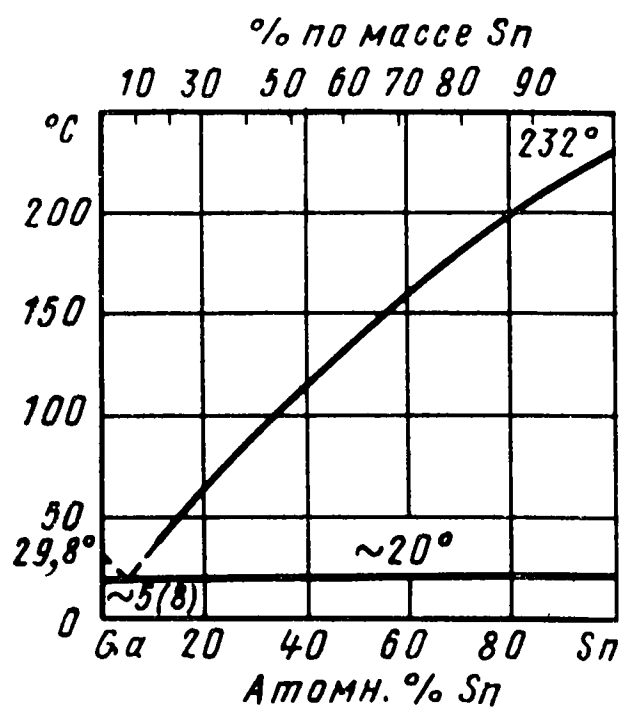


Рис. 29. Диаграмма состояния сплавов системы галлий — олово

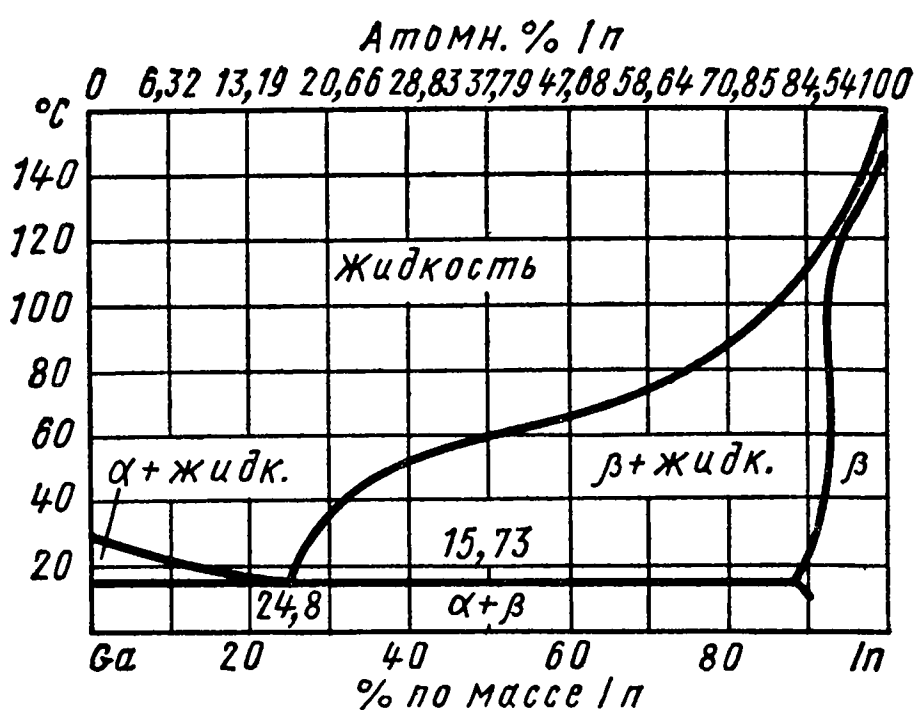


Рис. 30. Диаграмма состояния сплавов системы галлий — индий

Возможно образование этих припоев и в процессе пайки вследствие контактного плавления. При пайке в зазор между паяемыми изделиями из титана укладывают фольгу из медноникелевого сплава толщиной 0,1—0,003 мм или титановую фольгу, гальванически покрытую медью и никелем.

При пайке в интервале температур 960—1100° С вследствие контактного плавления образуется титаномедноникелевая эвтектика, являющаяся припоем.

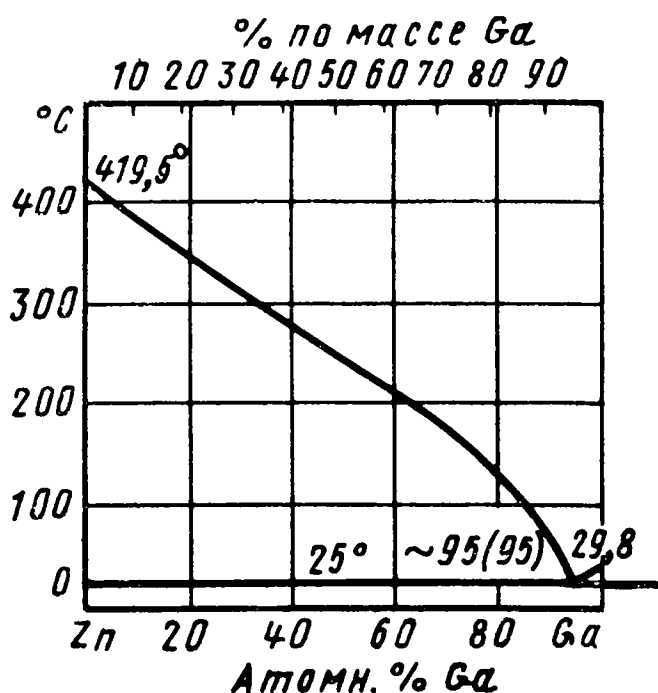


Рис. 31. Диаграмма состояния сплавов системы галлий — цинк

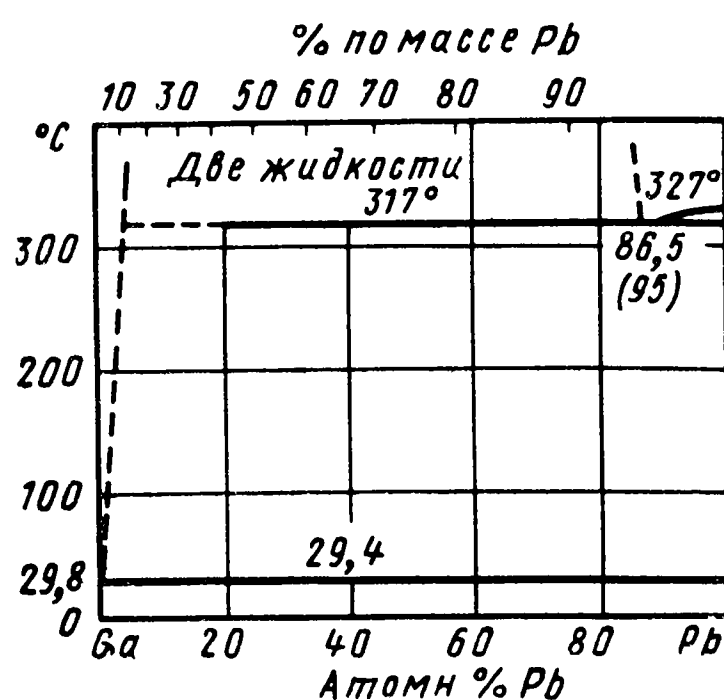


Рис. 32. Диаграмма состояния сплавов системы галлий — свинец

Для конструкций из тугоплавких сплавов, работающих при высоких температурах, применяют припои, приведенные в табл. 72. Пайка этими припоями затруднена из-за отсутствия специального нагревательного оборудования, особенно для изделий больших габаритов.

Нагрев в процессе пайки осуществляют в вакуумных печах, т. в. ч. плазменными горелками, электроконтактным способом и электронным лучом [2].

70. Галлиевые припои

Марка	Содержание элементов, %						Температура, °C	
	Ga	Te	Zn	Sn	In	Ag	начала плавле-ния	полного расплав-ления
—	100	—	—	—	—	—	—	29,8
—	99,5	0,5	—	—	—	—	—	27,3
—	95	—	5	—	—	—	25	25
—	92	—	—	8	—	—	20	20
—	82	—	6	12	—	—	—	17
—	76	—	—	—	24	—	16	16
—	67	—	4	—	29	—	—	13
—	62	—	—	13	25	—	—	5
—	61	—	1	13	25	—	—	3
ГИС	73,8—74,2	—	—	—	23,8—24,2	1,9—2,1	—	—
№2 *	55	—	—	11	25	—	10,6	10,6
ГИСМ	Сплав ГИС (34—36%) + медный порошок (64—66%)							

* Содержит 1% Zr, 4% Cd, 4% Mg.

71. Титановые припои

Содержание элементов, % (Ti — остальное)							Температура, °C		Предел прочности паяных соединений на Ti, кгс/мм²
Ni	Pd	Cu	Co	Be	Zn	Другие элементы	начала плавле-ния	полного расплав-ления	
28	—	12	—	—	—	—	—	—	—
52	—	15	5	—	—	—	—	—	26—42
—	—	—	—	4	—	48Zr	—	—	—
26	—	10	—	—	—	—	—	—	26
—	46	—	—	2	—	—	—	—	29—84
—	—	40	—	—	—	—	955	986	—
28	—	—	—	—	—	—	955	955	—
—	—	—	—	5	40	—	—	—	27—30
—	—	—	—	—	—	27Fe, 10Mo	—	—	—
43,7	—	—	—	—	—	4,2Si	950	1000	—
—	—	—	5	5	40	—	—	—	51—95
—	—	—	—	—	—	10V	—	—	—
—	—	—	—	—	—	27Fe	—	—	—
—	—	—	—	4	—	28V	—	—	—
—	—	50	—	—	—	3,5Si	—	975	—
—	—	—	28	—	—	3,0Fe	1025	1025	—

72. Титановые припои с цирконием, ванадием, ниобием, хромом и бериллием

Содержание элементов, % (Ti — остальное)						Температура, °C			Паяемый материал
Zr	V	Nb	Cr	Ni	Be	начала плавле-ния	полного расплав-ления	пайки	
—	30	—	—	—	—	—	1630	1650	Ниобий и его сплавы
48	—	—	—	—	4	950	—	1050	
—	—	—	33	—	—	1400	1450	1500	
—	15	—	5	—	—	—	—	1650	
50	—	—	—	—	—	1610	1620	1670	
—	27	9	—	—	—	—	—	1650	Вольфрам Молибден и его сплавы Тантал и его сплавы
56	28	—	—	—	—	1150	1205	1250	
—	—	80	—	—	—	2205	2260	2400	
—	20	—	—	—	—	1620	1650	1700	
—	20	—	—	—	—	1650	—	1700	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асиновская Г. А. Газопламенная пайка металлов. ВНИИавтоген. Вып. 7. М., Машгиз, 1955, с. 5—17.
2. Березников Ю. И. и Рощина Л. В. Припой для пайки молибдена со сталью марки 1Х18Н9Т. Сборник III. М., МДНТП. 1962, с. 19.
3. Брукер Х. Р. и Битсон Е. В. Пайка в промышленности. М., Оборонгиз, 1957, с. 79, 223, 264, 265.
4. Губин А. И. Пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов. М., «Машиностроение», 1964, с. 29—49.
5. Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. В. Пайка деталей электровакуумных приборов М., «Энергия», 1967, с. 35—56.
6. Губин А. И., Китаев А. М. Сварка и пайка тонкостенных трубопроводов. М., «Машиностроение», 1964, с. 55—62.
7. Коль В. Технология материалов для электровакуумных приборов. М., Госэнергоиздат, 1957, с. 293—298.
8. Лоцманов С. Н. Пайка алюминия и его сплавов. М., Оборонгиз, 1949, 28 с.
9. Лебединский М. А. Технология электровакуумного производства. М., Госэнергоиздат, 1961, с. 137—143.
10. Лакедемонский А. В., Хряпин В. Е. Паяние и припой. М., Металлургиздат, 1959, с. 38—86.
11. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Пайка металлов, М., «Машиностроение». 1967, с. 176—246.
12. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Пайка металлов. М., Машгиз, 1959, с. 73—122.
13. Манко Г. Пайка и припой. М., «Машиностроение», 1968, с. 102, 106, 113.
14. Родин А. И. Пайка серебряными припоями в пламени газовой горелки. М., Оборонгиз, 1954, с. 4—5.
15. Сланский А., Воллман Я. Капиллярная пайка. М., Машгиз, 1963, с. 57—77.
16. Туркин В. Д., Румянцев М. В. Структура и свойства цветных металлов. М., «Металлургиздат», 1947, с. 298.
17. Хрянин В. Е., Лакедемонский А. В. Справочник паяльщика. Изд. 4-е. перер. и доп. М., «Машиностроение», 1974, 327 с.
18. Чекунов И. П. Изготовление припоев методом порошковой металлургии. М., МДНТП, 1962, с. 46.
19. Шпагин А. И. Оловянистые бронзы баббиты, припой и их заменители. М., Металлургиздат, 1949, с. 31—37.
20. Hermann E. Das Hartlöten von Aluminium. «Aluminium» N 4, 1953, S. 139.
21. Setapen A. M. Brazingfiller Metals. Meets high temperature needs Iron Age, 181, N 19, 1958, p. 110.

К флюсам предъявляют следующие требования:

температура плавления флюса должна быть ниже температуры начала плавления припоя;

к моменту начала плавления припоя флюс должен смачивать поверхность основного материала;

при температуре пайки расплавленный флюс должен обеспечить полное удаление окислов и защиту от окисления основного металла и припоя;

флюс не должен терять активности и защитных свойств при длительном нагреве;

продукты флюсования не должны способствовать активному развитию коррозии паяных соединений;

при нагреве флюсы не должны выделять токсичных веществ.

В состав флюсов обычно входят основа, растворитель окисной пленки и активное флюсующее вещество. Иногда эти функции сочетаются в одном веществе, применяемом в качестве флюса.

Флюсы проявляют флюсующее действие лишь в определенном интервале температур, который называют температурным интервалом активности флюсов [9].

Если температура пайки ниже температурного интервала активности флюса, смачивание поверхности основного металла припоем недостаточно.

Повышение температуры приводит к испарению, разложению или выгоранию компонентов флюса.

Активность флюса является функцией не только температуры, но и выдержки при пайке. Этим обстоятельством нельзя пренебрегать при выборе флюса и определении оптимальных режимов пайки.

В связи с большим разнообразием в составах и свойствах материалов, которые используют в паяных конструкциях, создано большое количество самых разнообразных флюсов. Они представляют собой твердые, порошкообразные, жидкие, пастообразные и газообразные вещества. Сведения о составах и свойствах различных химических веществ и их сплавов, применяемых в качестве компонентов флюсов, содержатся в работах [3, 4, 9].

Процесс флюсования включает смачивание основного металла и припоя флюсом, удаление с них окисных пленок, вытеснение флюса из зазора расплавленным припоем и защиту места пайки от окисления образовавшимся шлаком.

После смачивания основного металла флюсом и удаления с него окисной пленки образуется активная межфазная граница твердый металл — жидкий флюс, которая затем замещается расплавленным припоем в условиях, практически исключающих возможность взаимодействия с атмосферой воздуха, что обеспечивает высокое качество спая.

Установлено, что флюсующее действие расплавов и растворов флюсов является результатом протекания целого ряда процессов, основными из которых являются [5, 6]:

химическое взаимодействие между активными компонентами флюса и окисной пленкой;

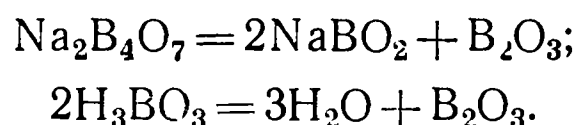
диспергирование окисной пленки в результате адсорбционного понижения ее прочности под влиянием расплава флюса;

химическое взаимодействие между активными компонентами флюса и основным металлом, результатом которого является отрыв пленки от поверхности основного металла и переход ее во флюс;

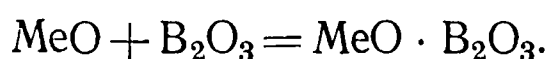
растворение окисной пленки в расплаве флюса;

растворение основного металла и припоя во флюсе.

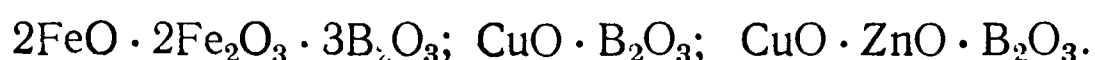
Механизм действия различных флюсов изучен очень мало. Считается, что тетраборнокислый натрий (обезвоженная бура) и борная кислота при нагреве разлагаются с выделением борного ангидрида:



Борный ангидрид играет роль активного флюсующего компонента. Он вступает в химическое взаимодействие с окислами паяемого металла и припоя и образует легкоплавкие комплексы по реакции



При пайке стали, меди и латуни образуются следующие бораты:

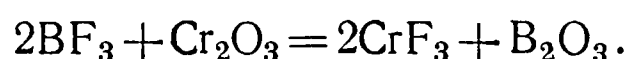


При наличии в составе флюсов фторидов одновременно имеет место растворение в них окисной пленки.

Высокую активность боридным флюсам придают добавки фторборатов, таких как фторбораты калия KBF_4 и натрия NaBF_4 . Фторборат калия при нагреве разлагается:

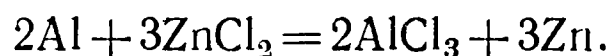


Выделившийся трехфтористый бор при пайке нержавеющей сталей вступает во взаимодействие с окисью хрома:

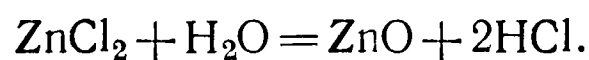


Борный ангидрид, в свою очередь, вступает во взаимодействие с окисной пленкой.

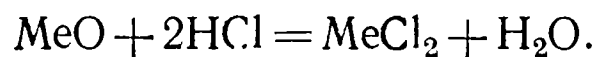
Механизм действия флюса типа 34А для пайки алюминия и его сплавов следующий [7—8]. При высокой температуре флюс плавится и через микропоры и трещины в окисной пленке проникает к поверхности основного металла. Хлористый цинк, являющийся активным флюсующим веществом, вступает во взаимодействие с алюминием по реакции



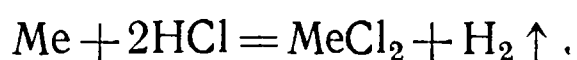
Газообразный хлористый алюминий, выделяясь из зоны реакции, способствует механическому нарушению окисной пленки. Нарушению ее целостности способствует также растворяющее действие фтористого натрия. Металлический цинк, высаживающийся на поверхности алюминия, вступает с ним во взаимодействие с образованием сплава, состав которого отвечает ликвидусу равновесной диаграммы состояния системы алюминий—цинк при температуре пайки [8]. Образование этого сплава способствует смачиванию поверхности алюминия припоем. При низкотемпературной пайке черных и цветных металлов с флюсами на основе водных растворов хлористого цинка последний гидролизуетс с образованием хлористого водорода



Хлористый водород взаимодействует с окислом по реакции



При растворении хлористого водорода в воде образуется соляная кислота, которая воздействует на металл с выделением водорода:



Расплавленный хлористый цинк, оставшийся на поверхности металла, играет роль защиты от окисления кислородом воздуха.

В некоторых работах [5, 12] делаются попытки рассмотрения процессов флюсования с точки зрения электрохимии, поскольку расплавленные соли по современным воззрениям находятся в ионизированном состоянии.

ФЛЮСЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ

Флюсы для пайки черных и цветных металлов. В качестве флюсов наибольшее распространение нашли смеси буры, борной кислоты и борного ангидрида. Такие флюсы успешно применяют при высокотемпературной пайке углеродистых сталей, чугуна, меди, латуни, бронз медными и серебряными припоями при температурах выше 800° С (табл. 1).

При необходимости удаления окислов с поверхности нержавеющей и жаропрочных сталей, алюминиевых бронз, нихромов в состав флюсов следует вводить такие активные компоненты, как фториды щелочных и щелочноземельных металлов или фторбораты. При добавлении фторидов температурный интервал действия флюсов повышается и достигает 850—1150° С, при добавлении фторборатов температура пайки не должна превышать 850° С.

Флюсы для пайки алюминиевых сплавов. На поверхности алюминиевых сплавов имеются окислы, более стойкие в термическом и химическом отношении, чем окислы железа или меди. В связи с этим флюсы для пайки алюминия должны обладать повышенной активностью, причем при более низких температурах. Для пайки алюминия и его сплавов припоями на основе алюминия и цинка в качестве основы используют смеси хлоридов щелочных металлов. Хорошо зарекомендовала себя эвтектическая смесь солей: хлористый литий—хлористый калий, а также минерал карналлит. Для повышения активности к основе флюсов добавляют хлориды тяжелых металлов, такие как хлористый цинк, хлористый кадмий, хлористое олово и др., а также фториды щелочных, щелочноземельных и тяжелых металлов.

Оптимальное содержание хлоридов тяжелых металлов во флюсе обычно не превышает 10—12%, значительное увеличение хлорида цинка до 20% и выше не оправдано, так как, несмотря на снижение температуры плавления флюса, температура активного действия его существенно не меняется. С увеличением содержания хлоридов тяжелых металлов во флюсе снижается коррозионная стойкость паяных соединений. Кроме того, увеличенное содержание хлорида цинка и олова во флюсе приводит к заметной эрозии основного металла, особенно при высокой температуре пайки.

Минералы карналлит и криолит уменьшают гигроскопичность флюсов, повышают их термическую стойкость, делают эти флюсы пригодными для длительной печной пайки или для пайки погружением в солевой расплав.

Составы, свойства и область применения наиболее распространенных флюсов для высокотемпературной пайки алюминия приведены в табл. 2.

Флюсы для пайки магниевых сплавов. Окисные пленки с поверхности магниевых сплавов удалять труднее, чем с алюминия. Они стойки в известных активных газовых средах и в вакууме. В качестве флюсов для пайки магниевых сплавов применяют системы солей, состоящие из хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов. Активными компонентами в них являются хлориды тяжелых металлов: цинка, кадмия, олова и других, которые в процессе пайки вступают в обменные реакции с основным металлом. Остатки этих флюсов вызывают электрохимическую коррозию паяных соединений, поэтому необходимо их тщательно удалять после пайки. Известны флюсы, в состав которых в качестве активного флюсующего компонента входят окислы металлов. Составы флюсов, применяемых при пайке магниевых сплавов, приведены в табл. 3.

Флюсы для пайки титана и его сплавов. На поверхности титана и его сплавов имеется очень стойкий окисел TiO_2 , который затрудняет пайку на воздухе.

Флюсы, рекомендуемые для пайки титана, состоят из хлоридов и фторидов металлов. Они малоактивны, в процессе пайки вступают во взаимодействие с титаном, загрязняя его поверхность. Припой недостаточно хорошо смачивает поверхность титана и плохо текут в зазор. Поэтому вопрос о флюсовой пайке титана является еще не решенным.

Ниже приведены составы флюсов (% по массе) для пайки титановых сплавов в печах и газовой горелкой припоями на алюминиевой основе.

1. Хлористый натрий	45	2. Хлористый калий	36
Хлористый калий	36	Хлористый стронций	45
Хлористое серебро	10	Хлористое серебро	10
Фтористый литий	9	Фтористый литий	9

**1. Флюсы для пайки никелевыми, медными и серебряными припоями
при температурах свыше 600°С**

Мар- ка	Компоненты	Содержа- ние, % по массе	Темпера- турный интервал активно- сти, °С	Паяемые металлы и характеристика флюса
—	Тетраборнокислый натрий (бура)	100	800—1150	Углеродистые стали, чугун, медь, латуни, бронзы и твердые сплавы (припой медно-цинковые и серебря- ные)
—	Бура Борная кислота	50 50	850—1150	
№ 7	Бура Борная кислота	80 20		
№ 200	Борная кислота Тетраборнокислый натрий Фтористый кальций	68—72 19—21 8—10		
№ 201	Борная кислота Тетраборнокислый натрий Фтористый кальций Лигатура *1 (Al; Cu; Mg) . .	79—81 13—15 5—6 0,4—0,6	850—1150	То же, флюс более активен из-за наличия в нем лига- туры
№ 209	Фтористый калий (обезво- женный) Фторборат калия Борный ангидрид	33—37 21—25 33—37		600—850
№ 284	Фтористый калий (обезво- женный) Фторборат калия Борный ангидрид	33—37 40—44 23—25	500—850	Стали, никелевые и медные сплавы (припой серебря- ные)
№ 18В	Фтористый калий (обезво- женный) Борная кислота	40 60	650—850	
—	Тетраборнокислый натрий Борная кислота Фтористый натрий	34—38 49—53 13—15	≥ 850	Углеродистые, хромоникеле- вые стали, чугун, медь и ее сплавы (припой — крем- нистые латуни)
—	Бура Борная кислота Сода	40 40 20	—	Латунь и медь
—	Борная кислота Углекислый литий Углекислый калий	50—60 20—25 20—25	—	Чугун (припой латунные)
—	Бура Борная кислота Кальций хлористый	58 40 2	—	Латунь и медь

*1 Состав лигатуры: 48% Al, 48% Cu, 4% Mg.

*1 Состав лигатуры: 48% Al, 48% Cu, 4% Mg.

Продолжение табл. 1

Мар-ка	Компоненты	Содержа-ние, % по массе	Темпера-турный интервал активно-сти, °С	Паяемые металлы и характеристика флюса
—	Бура Фтористый натрий Хлористый натрий	90 2,6—2,8 7,2—7,4	800—1150	Чугун (припой латунные, легированные алюминием)
—	Калий фтористо-водородный Борная кислота	45—55 55—45	—	Сверхтвердые сплавы и вы-сокоуглеродистые инстру-ментальные стали
—	Фтороокись калия Фторборат калия Борная кислота Раствор едкого калия (35—65%)	20—40 15 40—65 5—25	550—950	
—	Борная кислота Бура Фтористокислый калий Фторборат калия Фтористый литий	60—80 5—25 4—10 2—8 1—5	870—920	Медь с нержавеющей сталью. Флюс изготавливают путем растворения в воде при на-греве указанной смеси со-лей в отношении 4 : 1, после охлаждения флюс имеет консистенцию пасты
—	Бура Хлористое олово Фтористый кальций Жидкое стекло Борная кислота Вода	15—20 5—15 10—50 5—50 ≤ 10 5—25	—	Медь и ее сплавы. Паяльную пасту изготавливают путем смешения смеси с порош-ком припоя (медь, серебро, золото и др.)
—	Борная кислота или борный ангидрид Многовалентный спирт (эти-ленгликоль, пропиленгли-коль и т. д.) Стабилизирующее масло .	70 25 5	—	Латуни и бронзы. Флюс обеспечивает высокую кор-розионную стойкость пая-ных соединений
—	Фторборат калия Борная кислота Вода Коллоидный раствор крем-ниевой кислоты	4 *2 5 *2 30 *3 20 *3	—	Флюс — паста для пайки чер-ных и цветных металлов. После 12 ч выдержки или обработки в водяной бане при 60°С смесь превращает-ся в плотный гель, кото-рый хорошо хранить и транспортировать в тубах
—	Вольфрамат кобальта Фтористый калий Фтористый натрий Окись вольфрама Окись кобальта Окись бора	0,1—8 5—8 2—4 1—10 0,1—1 Остальное	1000—1200	Твердосплавный инструмент
—	Борная кислота Бор Фтористый натрий Бура Фтористый кальций	3—5 0,05—0,4 2—5 6—9 80—85	1200	Нержавеющие стали (пайка в вакууме)

*2 Частей по массе.

*3 Объем, мл.

2. Флюсы для высокотемпературной пайки алюминия и его сплавов

Марка	Компоненты	Содержание, % по массе	Температурный интервал активности, °С	Назначение и характеристика
34А	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый натрий Хлористый цинк	54—56 29—35 9—11 8—12	420—620	Пайка алюминия и его сплавов, не содержащих магния свыше 1—1,5%. Нагрев печной, газопламенный, т. в. ч. Исключается пламя кислородно-ацетиленовых горелок из-за потери активности флюса
Ф320А	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый натрий Хлористый цинк	28 42 6 24	420—620	
Ф3	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый натрий Хлористое олово	47 38 10 5	420—620	
Ф5	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый натрий Хлористое олово Хлористый кадмий	45 38 10 3 4	420—620	Пайка алюминиевых сплавов типа АД1, АМц, АМг. Флюс менее гигроскопичен из-за отсутствия хлористого цинка
Ф370	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый натрий Хлористый кадмий	47 38 5 10	560—620	
Ф380	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый натрий Хлористый цинк	47 38 5 10	560—620	Пайка алюминиевых сплавов в соляных ваннах
№ 17	Хлористый калий Хлористый литий Карналлит	51 41 8	570—620	Пайка погружением в соляных ваннах
ФВЗХ	Хлористый калий Хлористый литий Хлористый цинк Фтористый натрий	40 36 16 8	—	Пайка алюминиевых сплавов припоями на цинковой основе
124	Хлористый калий Хлористый литий Хлористый натрий Хлористый цинк Фтористый натрий	41 23 22 8 6	550—620	Пайка сплавов типа АД1, АМц, АМг в печи и в соляных ваннах
—	Хлористый калий Хлористый литий Хлористый натрий Фтористый калий Фтористый алюминий	45 35 10 5 5	580—620	Пайка алюминия и его сплавов в соляных ваннах и в печах Из-за отсутствия хлористого цинка флюс менее гигроскопичен, термически более стоек и не вызывает сильной эрозии паяемого металла

Продолжение табл. 2

Марка	Компоненты	Содержание, % по массе	Температурный интервал активности, °С	Назначение и характеристика
—	Хлористый натрий Хлористый калий Хлористый литий Фтористый калий Фтористый алюминий Хлористый цинк или хлористый кадмий	12 44 34 4,6 5,4 0,1	—	Пайка погружением в расплав флюса без предварительного нанесения припоя. Припоем служит жидкий сплав цинка с алюминием, образующийся на поверхности детали в результате обменной реакции алюминия с хлоридом цинка
—	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый калий Хлористый свинец Хлористый кадмий Фтористый цинк	40—50 30—50 9—13 1—2 1—6 ≤ 3	—	Флюс обладает высокой активностью, рекомендуется для пайки горелкой
—	Хлористый цинк Хлористый кальций Хлористый калий Хлористый натрий Фтористый натрий Фтористый калий	20—30 15—20 34—40 15—20 1,8 3,5	—	Пайка припоями на цинковой основе типа сплава 30% Al и 70% Zn
—	Хлористый калий Хлористый натрий Хлористый литий Фтористый литий Кислый фтористый аммоний	55—65 12—18 15—25 2—5 4—6	—	Пайка алюминиево-магниевых сплавов припоями на основе алюминия с добавкой магния
—	Хлористый калий Хлористый натрий Хлористый литий Фтористо-кислый аммоний Фтористый литий	60 15 17 5 3	—	Пайка алюминиево-магниевых, а также магниевых сплавов позволяет производить анодирование паяного шва без его потемнения. Рекомендуется для пайки горелкой
—	Хлористый натрий Хлористый калий Хлористый литий Хлористый стронций Фтористый калий Криолит	24 34 19 6 1 16	—	Пайка в печах с воздушной атмосферой. Флюс можно растворять в воде и наносить на поверхность детали путем ее погружения в 2—7%-ный раствор флюса с последующей сушкой при 150 °С
—	Хлористый калий Хлористый литий Хлористый кальций Фтористый натрий Хлористый натрий	55—57 23—30 7,5—8,5 6,5—7,5 2—5	—	Для пайки тонкостенных деталей в печи при длительных выдержках
—	Хлористый калий Хлористый литий Фторцирконат калия	40—60 30—50 1—10	—	Для пайки погружением труднопаяемых сплавов алюминий—магний, алюминий—магний—кремний

3. Флюсы для пайки магния и его сплавов

Марка	Компоненты	Содержание, % по массе	Темпера- турный интервал активно- сти, °С	Назначение
№ 5	Карналлит плавленный Криолит Окись цинка	89 8 3	420—620	Пайка магниевых сплавов припоями на основе магния с добавками алюминия и цинка
№ 8	Хлористый калий Хлористый натрий Хлористый литий Фтористый калий Хлористый стронций	35 35 20 5 5	435	
№ 12	Хлористый калий Хлористый натрий Хлористый литий Фтористый натрий Фторалюминат натрия	31,5 9 49,5 8 2	600	
Ф380МГ	Хлористый калий Хлористый натрий Хлористый литий Фтористый натрий Фторалюминат натрия	42,5 10 37 10 0,5	600	
ДАУ450	Хлористый калий Хлористый натрий Хлористый литий Фтористый натрий	46 24 26 4	538 - 600	
ДАУ451	Хлористый калий Хлористый натрий Хлористый литий Фтористый натрий Фтористый литий	42 21 23 4 10	540—600	Пайка магниевых сплавов припоями на основе магния с добавками алюминия и цинка
ДАУ452	Хлористый калий Хлористый натрий Хлористый литий Фтористый натрий Фторалюминат натрия	42,5 10 37 10 0,5	400	
Ф134	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый цинк Хлористый кадмий Хлористый цинк	35 30 10 15 10	390—420	Пайка магниевых сплавов и сплавов алюминия со зна- чительным содержанием маг- ния (АМгЗ, АМг5, АМг6Т)
Х143	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый натрий Хлористый кадмий	43 34 8 15	410—430	
—	Хлористый калий Хлористый магний Хлористый барий Фтористый кальций	55 34 9 2	430—540	Пайка магниевых сплавов погружением в расплав со- лей. Рекомендуется для при- поев системы магний — цинк — кадмий *

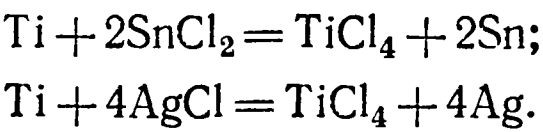
* Флюс замешивают на спирту и наносят в виде пасты на паяемое изделие.

Продолжение табл. 3

Марка	Компоненты	Содержание, % по массе	Темпера- турный интервал активно- сти, °С	Назначение
—	Хлористый калий Хлористый натрий Хлористый литий Фтористый литий Фтористоокислый аммоний	60 15 17 3 5	—	Пайка магниевых и алю- миниевомагниевых сплавов припоями на основе алюми- ния
—	Хлористый барий Фторид щелочноземельного металла Плавленый карналлит . . .	8—12 1—7 ост.	—	Пайка магниевых сплавов методом погружения

Известен способ реактивно-флюсовой пайки титана с флюсами, содержащими большое количество хлорида олова или серебра. Лужение с помощью реактивных флюсов основано на реакции восстановления, которая происходит между титаном и хлоридом металла.

Примеры подобных реакций:



Хлорид титана представляет собой газ, который улетучивается из зоны реакции, а восстановленное олово или серебро покрывает поверхность титана. По покрытию пайка производится обычным способом.

ФЛЮСЫ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ

Флюсы для низкотемпературной пайки металлов делят на флюсы на основе органических и неорганических соединений. Флюсы второй группы, как правило, более активны, но соединения при этом менее коррозионностойки.

Флюсы на основе органических соединений. Для пайки низкотемпературными припоями широко распространенным флюсом является канифоль.

Составы флюсов на основе канифоли приведены в табл. 4.

4. Флюсы на основе канифоли

Марка	Компоненты	Содер- жание, % по массе	Темпера- турный интервал активно- сти, °С	Назначение
КЭ	Канифоль Спирт этиловый	30 70	150—300	Пайка меди припоями с со- держанием олова ≥30%; для латуней и бронз менее эффективен
—	Канифоль Стеарин Спирт этиловый	24 1 75	180—300	
ЛТИ-120	Канифоль Диэтиламин солянокислый Триэтаноламин Спирт этиловый	24 4 2 70	200—350	Пайка меди и ее сплавов, углеродистой стали и цинка

Продолжение табл. 4

Марка	Компоненты	Содержание, % по массе	Температурный интервал активности, °С	Назначение
ЛМ-1	Ортофосфорная кислота (плотность 1,6—1,7) Канифоль Спирт этиловый или этилен- гликоль	32 6 62	200 – 240	Пайка хромоникелевых нержавеющих сталей при- поями с содержанием олова ≥ 30%; для пайки меди и ее сплавов не рекомендуется
ЛК-2	Хлористый аммоний Хлористый цинк Канифоль Спирт этиловый	1 3 30 66	200—360	Пайки меди, латуни и оцинкованного железа
—	Канифоль Анилин солянокислый Спирт этиловый	22 2 76	200—350	
—	Канифоль Гидразин солянокислый Спирт этиловый	25 5 70	200—350	
—	Канифоль Молочная кислота Спирт этиловый	20 5 75	200—260	
—	Канифоль Животный жир Нашатырь Хлористый цинк Вода	10 * 5 * 2 * 1 * 1 *	180—300	Пайка меди, углеродистой стали и свинца, флюс-паста
—	Вазелин технический Канифоль Глицерин Хлористый цинк Парафин	45 30 15 6 4	180—300	Пайка медных электротех- нических приборов, флюс- паста
—	Канифоль Цинк хлористый Вазелин	16 4 80	200 – 300	Пайка меди, латуни, флюс- паста
—	Канифоль Касторовое масло Стеарин Аммоний хлористый Хлористый цинк Вода	34 26 14 8 7 11	180—300	Пайка меди, латуни, флюс- паста
Паста Нисо	Глицерин Вазелин Хлористый цинк	5 80 15	200—360	Пайка меди
* Частей по массе.				

5. Бесканифольные органические флюсы

Марка	Компоненты	Содержание, % по массе	Температурный интервал активности, °С	Паяемые металлы
—	Молочная кислота Вода	15 85	180—280	Медь, латунь, бронза
—	Солянокислый гидразин . . Вода	5 95	150—330	
Ф38Н	Этиленгликоль или глицерин (или их смесь 1 : 1) . . Диэтиламинсолянокислый . . Ортофосфорная кислота . .	50 25 25	350 *1	Нихром, бериллиевая бронза, константан, нержавеющая сталь
ФИМ	Ортофосфорная кислота . . Этиловый спирт Вода	0,2 *2 1 *2 1 *2	—	Алюминиевая и бериллиевая бронзы, нержавеющие стали
ВТС	Вазелин Салициловая кислота Триэтилоламин Спирт этиловый	100 *3 10 *3 10 *3 40 *3	180—300 (280—300 *1)	Медь, серебро, золото и их сплавы
—	Глицерин Аммоний хлористый (насыщенный раствор) Цинк хлористый (насыщенный раствор)	26 3 72	—	Медь и ее сплавы, оцинкованное железо
—	Глицерин Гидразин солянокислый . . Вода	35 5 60	250—350	Медь и ее сплавы, никель, серебро, углеродистые стали
Ф10	Вода Глицерин Хлористая медь Хлористое олово	47 47,9 0,1 5,0	200—300	Углеродистые стали
Ф16	Вода Глицерин Хлористый кадмий CuCl ₂ · 2CuO · 4H ₂ O Хлористое олово	40 40 9,6 0,8 9,6	200—290	
Ф25	Вода Глицерин Хлористое олово Хлористый кадмий Соляная кислота	41 40 5 10 4	200—300	Нержавеющие стали

*1 Максимальная активность.
*2 Объем, л.
*3 Масса, г.

Кроме канифоли и спирта в качестве органической основы флюсов могут служить глицерин, этиленгликоль, триэтаноламин, органические кислоты и другие соединения. Составы таких флюсов приведены в табл. 5.

Существует целая группа органических флюсов для низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов, основу которых составляет органический аминоспирт — триэтаноламин. Активными добавками являются фторбораты тяжелых металлов и аммония. Составы флюсов, нашедших применение в практике, приведены в табл. 6.

Флюсы на основе неорганических соединений. Основными составляющими неорганических активных флюсов для низкотемпературной пайки являются хлориды металлов. Наиболее распространены хлористый цинк и хлористый аммоний.

В смеси хлористый цинк и хлористый аммоний более активны, чем каждая соль в отдельности. Температура плавления смеси ниже, чем температура плавления каждого компонента: при содержании 27 мол % хлористого аммония между $ZnCl_2$ и соединением $ZnCl_2 \cdot NH_4Cl$ образуется эвтектика с температурой плавления $232^\circ C$ [14].

При содержании 49 мол % хлористого аммония образуется еще более легкоплавкая эвтектика с температурой плавления $180^\circ C$. Эвтектика $ZnCl_2-NH_4Cl$ (28% NH_4Cl) рекомендуется в качестве флюса.

Составы наиболее употребительных активных неорганических флюсов приведены в табл. 7.

В последние годы рекомендованы новые составы флюсов для низкотемпературной пайки, которые приведены в табл. 8.

6. Флюсы для пайки алюминия и его сплавов легкоплавкими припоями

Марка	Компоненты	Содержание, % по массе	Температурный интервал активности, °C	Назначение
Ф59А	Триэтаноламин Фторборат кадмия Фторборат цинка Фторборат аммония	82,5 10 2,5 5	150 – 320	Пайка алюминия и сплава АМц с медью и сталью припоями на основе олово — цинк и цинк — кадмий
Ф61А	Триэтаноламин Фторборат цинка Фторборат аммония	82 10 8		
Ф54А	Триэтаноламин Фторборат кадмия Фторборат аммония	82 10 8		
—	Триэтаноламин Аммоний хлористый Олово хлористое	82 10 8		
—	Триэтаноламин Плавиковая кислота	60 40	—	Пайка алюминиевых сплавов

Продолжение табл. 8

Компоненты	Содержание, % по массе	Назначение, свойства и особенности применения
Бензойная кислота Смачивающая добавка ОП7 Вазелин Хлористый аммоний	50—60 *1 8—10 *1 860—880 *1 50—60 *1	Обладает повышенной смачивающей активностью
Флюс КЭ Муравьиная кислота Аммиачная вода 24—25%	82 *2 6 *2 12 *2	Не требует удаления остатков после пайки
Флюсы, образующие на поверхности металла защитные пленки		
Полиэфирная смола Метилэтилкетон	20 80	Образует на поверхности изделия электронизоляционную и антикоррозионную пленку
Камфора Смола полиэфирная Дибутилфталат Спирт этиловый Этилацетат	4—20 16—28 1,6—2 1,2—2 51—61	Камфора и дибутилфталат придают пленке флюса эластичность. Флюс наносят кистью или погружением с последующей сушкой на воздухе в течение 1—2 ч
Моноперфтороалконат гидразина (с 7—16 атомами углерода)	100	Пайка оловянно-свинцовыми, цинко-кадмиевыми, оловянно-цинковыми припоями. После пайки флюс образует на паяемой поверхности коррозионностойкое полимерное покрытие
Полиэфирная смола Хлористое олово Моноэтаноламин Канифоль Ацетон	18—20 1—1,5 1—2 3—5 Ост.	Консервирующий флюс для пайки меди и ее сплавов. Защищает поверхность при межоперационном хранении
Флюсы для пайки сталей		
Хлористое олово Глицерин Дистиллированная вода Хлористая медь	9—11 44—46 42—47 До 0,4	Пайка углеродистых и низколегированных сталей. Флюс отличается слабой коррозионной активностью
Хлористый кадмий Хлористое олово Соляная кислота Глицерин Дистиллированная вода	9—11 4—6 3—5 38—42 40—42	Пайка нержавеющей сталей
Хлористый цинк Хлористый аммоний Двухлористое олово (SnCl ₂) Соляная кислота Хлористый хром (CrCl ₃) Поверхностно-активные вещества Вода	30—50 7—14 1—5 1—5 0,5—8 1 Остальное	Пайка стальных листов, покрытых хромом, нержавеющей стали, литейного чугуна, меди, латуни
Окислы тяжелых металлов (Pb, Sn и др.) Хлориды и бромиды тяжелых металлов Хлорид меди Хлористый аммоний	5 15 22 58	Пайка чугуна даже малооловянистыми припоями. Порошок флюса в виде пасты замешивают на спирте или глицерине

Продолжение табл. 8

Компоненты	Содержание, % по массе	Назначение, свойства и особенности применения
Янтарнокислый аммоний (насыщенный водный раствор) Триэтаноламин	97—98 Остальное	Пайка нержавеющей стали. Флюс имеет пониженную коррозионную активность
Янтарнокислый аммоний (насыщенный водный раствор) Триэтаноламин Глицерин	48—50 7—10 Ост.	Пайка низкоуглеродистых сталей. Флюс имеет пониженную коррозионную активность
Хлористый цинк Хлористый кадмий Хлористый никель Хлористая медь Глицерин Вода Триэтаноламин (в количестве, обеспечивающем pH=6)	3,8—4,8 8—9 1,6—1,8 0,15—0,25 42—43 42—43 —	Пайка конструкционных сталей припоями типа ГГОС. Флюс обеспечивает повышенную коррозионную стойкость соединений
Флюсы для низкотемпературной пайки меди и ее сплавов		
Канифоль Олеиновая кислота Гидроокись аммония Гидрохлорид моноэтанолamina Изопропиловый спирт Вода	15 1 5 2 75 2	При нагреве выделяет летучие вещества и оставляет на поверхности детали водонепроницаемую защитную пленку
Терфенил Анилин Анилингидрохлорид	41 *3 53 *3 6 *3	Для пайки меди и ее сплавов серебра, железа, никеля
2-пиридинкарбоксильная кислота . . Диэтилэтиленгликолевый эфир . . . Вода	5—40 10—50 Остальное	Наряду с высокой активностью обеспечивает получение чрезвычайно коррозионностойких соединений
Один из видов органической угольной кислоты (капроновая, каприловая, лауриновая и т. д.) Хлористый аммоний Диэтиленгликоль	10—85 5—30 40—60	Обеспечивает высокую коррозионную стойкость паяных соединений. Остаточные шлаки отсутствуют
Хлористый парафин 70%-ный . . . Смола	2 98	Отличается высокой технологичностью, стабильностью и коррозионной стойкостью
Живичная канифоль Янтарная кислота Трихлорэтилен Спирт этиловый Ксилан	50 *1 2,5 *1 100 *2 32 *2 32 *2	Остатки флюса некоррозионно-активны
Хлористый аммоний Бура Бикарбонат натрия	20 60 20	Пайка медных сплавов припоями системы медь—фосфор—олово—цинк
Канифоль Анилин солянокислый Триэтаноламин Бензтриазол Этиловый спирт	20—25 3,5—5 1—2 2,8—3,2 Остальное	Обеспечивает повышенную коррозионную стойкость, предотвращает обесцинкование латуни

Продолжение табл. 8

Компоненты	Содержание, % по массе	Назначение, свойства и особенности применения
Хлористый цинк Хлористый аммоний Вода	8—58 5—31 32—71	Предотвращает коррозию до пайки и после пайки. Флюс указанного состава берут за 100 частей по массе, к ним добавляют около 400 частей текучего парафина или безводного ланолина
<i>Флюсы для пайки цинка, свинца, кадмия, олова</i>		
Хлористый аммоний Соляная кислота Двухосновная органическая кислота Спирт (растворимый в воде) Поверхностно-активное вещество	0,5—2*3 0,1—0,5*3 0,05—1*3 0,1—1*3 0,05—1*3	Пайка цинка и его сплавов. Флюс почти не оставляет шлака; не требуется очистка деталей после пайки, не выделяет при нагреве вредных газов
Борфтористая кислота (40%-ный раствор) Алколаминоновый гидрохлорид Глицерин Поверхностно-активные реагенты (неионные реагенты типа полиоксигетиленалкилфенол) Вода	1—30 5—40 5—40 0,2—1 5—60	Пайка цинковых сплавов и оцинкованного железа
Диметилформамид Себаценовая кислота Моноэтанолламингидрохлорид (до необходимой консистенции флюс разводят в метилцеллюлозе)	75*3 25*3 1,2*3	Пайка луженой жести. Флюс устойчив при температуре пайки 320 °С, не дает токсичных остатков
Диметилформамид Гемеллитовая кислота	75*3 25*3	Пайка луженой жести припоем на основе свинца
Хлорид цинката аммония Хлориды щелочных металлов Гранулированный инертный к флюсу материал (плотность 0,1—1 г/см ³) Оксид и карбонит цинка Основная или фенолформальдегидная смола	60 4—18 1,5 5—25 0,1—1	Пайка консервных банок припоем на основе свинца. Флюс способен сохранять свои свойства в процессе длительного нагрева в контакте с припоем при температуре 385 °С
Эвтектический сплав NaOH (42%) и KOH (58%) Вода Глицерин	20—30 2—3 Остальное	Пайка цинка, цинкоалюминиевых сплавов или оцинкованного алюминия
<i>Флюсы для пайки алюминия и его сплавов</i>		
Иодид титана Канифоль Капроновая кислота	4,2—10 16,8—22 Остальное	Обладает повышенной активностью
Моноэтанолламин, диэтанолламин, триэтанолламин или аминовый спирт Борфтористый хром	70—95 5—30	Не оказывает коррозионного воздействия на паяемый металл. Для повышения активности вместе с борфтористым хромом можно вводить фтористый бор BF ₃ , фторборат аммония, фтористый аммоний

Продолжение табл. 8

Компоненты	Содержание, % по массе	Назначение, свойства и особенности применения
Триэтаноламин ¹ или другие амины с высокой точкой кипения . Комплекс первичных или вторич- ных алкиламинов и борофтори- стых соединений тяжелых метал- лов Смола	15–30 3–25 Остальное	Пайка алюминия с медью; остат- ки флюса не удаляют
Борофтористый аммоний, борофто- ристый кадмий и др. Эпоксидная смола	4–7 Остальное	Пайка алюминия в электропри- борах, зону пайки покрывают слоем из затвердевшей эпоксидной смолы, что увеличивает долговечность сое- динения. Коррозионная стойкость высокая. Можно применять для сплавов с 2% магния
Моноэтаноламин Триэтаноламин Фторборат аммония Окись цинка	14 67 14 5	При приготовлении флюса твер- дые компоненты растворяют в мо- ноэтаноламине, нагревая его до по- лучения прозрачной жидкости, после чего добавляют триэтанол- амин и диэтиленгликоль. После охлаждения флюс должен быть прозрачным без твердых остатков
Хлористый цинк (или хлористый кадмий, олово, бромистый аммо- ний и т. п.) Хлористый аммоний Фтористый аммоний Метанол	7,5 * ³ 2 * ³ 0,1 * ³ 25 * ³	Пайка припоем олово—цинк при температуре 400 °С
Иодид лития Олеиновая кислота	5–17 Остальное	Малотоксичен
Ароматическая кислота или ее соли Борофтористый аммоний Аминоспирт	2–10 4–22 Остальное	Обеспечивает повышенную корро- зионную стойкость соединений
*1 Масса, г. *2 Объем, мл. *3 Частей по массе.		

СПОСОБЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И НАНЕСЕНИЯ ФЛЮСОВ

Флюсы для высокотемпературной пайки черных и цветных металлов. Характеристика флюса зависят не только от его химического состава, но и от способа приготовления. Буру, борную кислоту и другие соединения бора, используемые для приготовления флюсов, необходимо предварительно прокаливать для удаления кристаллизационной воды, которая может привести к значительному порообразованию в процессе пайки. Буру плавят в графитовых тиглях при температуре 740—800° С выливают на противни из нержавеющей стали. После остывания ее размалывают в фарфоровых мельницах или растирают в тонкий порошок. Другие компоненты флюса обезвоживают путем прокаливания при температурах 300—400° С.

Флюсы типа № 200, 201, 209 и т. п. готовят путем тщательного смешения обезвоженных и хорошо растертых порошков соответствующих компонентов. Хранить порошкообразные флюсы ввиду их гигроскопичности рекомендуется в стеклянной посуде с притертой пробкой.

Перед употреблением эти флюсы рекомендуется замешивать на воде или спирте и наносить на соединяемые поверхности до нагрева деталей под пайку. Лучшие результаты в качестве растворителя обеспечивает применение не этилового спирта и воды, а многоатомных спиртов: глицерина, этиленгликоля, пропиленгликоля и др., что объясняется отсутствием в этом случае вредного воздействия воды. Кроме того, образующийся в процессе реакции борной кислоты со спиртом летучий эфир создает в зоне паяного соединения газовую защиту от окисления кислородом воздуха.

9. Методика приготовления флюсов

Составляющие флюса	Способ приготовления
Канифоль Спирт этиловый	Измельченную канифоль растворяют в спирте
Канифоль Хлористый цинк Хлористый аммоний Спирт этиловый	Все компоненты растворять в спирте, через сутки осторожно слить жидкость и применять ее для пайки
Канифоль Гидразин солянокислый Глицерин Спирт этиловый	Канифоль растворить в спирте, добавить гидразин, размешать флюс до полного его растворения, затем добавить глицерин
Канифоль Хлористый цинк Хлористый аммоний Вазелин Вода	Растирают канифоль со стеарином и полученную смесь расплавляют. Отдельно готовят раствор хлористого цинка и хлористого аммония в воде. Этот раствор вливают в расплав стеарина с канифолью. Размешать до получения однородной смеси и добавить вазелин
Ортофосфорная кислота Спирт этиловый Вода	Смешивают этиловый спирт и воду с последующим добавлением ортофосфорной кислоты
Хлористый цинк Вода	Хлористый цинк растворяют в воде
Флюсы типа ЗИЛ-1, ЗИЛ-2	Отдельно готовят водные растворы хлористого цинка, хлористого калия и хлористого аммония. В раствор хлористого цинка последовательно вливают растворы хлористого калия и аммония. Двуххлористое олово растворяют в соляной кислоте и вливают в раствор горячую воду. Раствор двуххлористого олова вливают в раствор хлористого цинка и хорошо перемешивают
Триэтанолламин Фторбораты тяжелых металлов Фторборат аммония	Триэтанолламин разделить на порции в соответствии с числом остальных компонентов флюса. В каждую порцию триэтанолламина ввести и размешать соответствующий компонент, затем все порции слить вместе и тщательно размешать. Готовый флюс вылить в стеклянную посуду

Рекомендуются также флюсовые пасты в виде гелей, получаемые при использовании в качестве растворителя коллоидных растворов кремниевой кислоты, или флюсы, замешанные на жидком стекле.

В тех случаях, когда это возможно, хорошие результаты дает нанесение флюса на паяемую поверхность непосредственно во время пайки.

В состав флюса № 201 с целью повышения его активности вводят порошок металлической лигатуры, которая представляет собой сплав состава 4% Mg, 48% Al, 48% Cu. При приготовлении сплава сначала сплавляют алюминий с медью и затем при температуре около 700°C в него вводят магний при сильном перемешивании расплава. Остывшую лигатуру размалывают и вводят во флюс. Действие лигатуры основано на том, что при температуре пайки магний и алюминий способствуют восстановлению окислов на основном металле и припое.

Флюсы для пайки легких сплавов. Флюсы на основе хлоридов щелочных и щелочно-земельных металлов готовят путем сплавления солей. Хлористый литий и калий, а также фториды металлов перед приготовлением флюса прокаливают при $600\text{--}650^{\circ}\text{C}$. Хлориды тяжелых металлов, цинка, олова, свинца перед приготовлением флюса переплавляют.

Флюсы, полученные путем сплавления, а не простого смешивания отдельных компонентов, более активны.

В случае пайки погружением в расплав флюса необходимы тщательная просушка исходных компонентов флюса и обезвоживание расплава солей, так как в присутствии следов влаги фтористый алюминий — обычный компонент всех флюсовых ванн — теряет свою активность. Для очистки ванны от солей тяжелых металлов, которые загрязняют поверхность паяемых деталей, необходимо производить рафинирование солевого расплава пластиной чистого алюминия, стружкой сплава алюминий—марганец или алюминий—магний, что еще более эффективно.

В качестве материала ванн рекомендуется брать никель или сплавы на его основе, так как при высокой температуре пайки погружением, которая обычно составляет $580\text{--}620^{\circ}\text{C}$, расплавленная соль очень активна и может разъедать стенки ванны.

Флюсы для низкотемпературной пайки металлов. Методика приготовления наиболее типичных флюсов приведена в табл. 9.

Флюсы, содержащие хлориды цинка и аммония, нужно хранить в металлической таре. Эти флюсы могут содержать хлориды меди, олова, кадмия, свинца. В последнем случае флюс готовят и хранят в стеклянной или керамической посуде.

Хлоридные флюсы применяют при пайке в виде порошков, паст, водных растворов, которые наносят на поверхность изделия до пайки с помощью кисточек или путем погружения в раствор флюса.

Флюсы на основе канифоли и другие органические флюсы, как правило, используют в виде жидких растворов или паст.

УДАЛЕНИЕ ОСТАТКОВ ФЛЮСОВ

1. Высокотемпературная пайка черных и цветных металлов. Остатки флюсов в виде продуктов реакций взаимодействия компонентов флюсов с основным металлом и припоем почти всегда присутствуют на поверхности паяного соединения. Как правило, они ухудшают качество паяного соединения, портят внешний вид изделия, снижают коррозионную стойкость соединения. Способы удаления остатков зависят от состава и свойств флюсов. В частности, продукты взаимодействия буры с окислами при остывании паяного соединения образуют стекловидную массу, прочно связанную с паяемой поверхностью. Она практически не растворяется в воде и с трудом удаляется при механической зачистке. Эту стекловидную корку можно удалять обработкой в специальных растворах при нагреве, механическим путем (очистка пескоструйная или металлическими щетками) и, наконец, быстрым охлаждением изделия после пайки с целью создания напряжений на границе металл — шлаковая корка. Последний способ далеко не всегда применим ввиду опасности возникновения трещин в шве. Со стальных деталей, паянных медными или серебряными припоями, остатки боридных флюсов принято удалять обработкой деталей в растворе 10%-ной серной кислоты с добавлением 200 г на 1 л хромовой кислоты. Время обработки 10—15 мин при температуре раствора около 40°C .

Рекомендуется также промывка паяных изделий в водном растворе кислого сернокислого калия K_2SO_4 (10%-ный раствор). Промывку ведут в течение 10—60 мин при температуре раствора 40—60° С. После очистки детали промывают в проточной воде и сушат на воздухе.

Флюсы № 209 и 284 не образуют стекловидных остатков и могут быть удалены кипячением в воде или горячем 10%-ном водном растворе лимонной кислоты.

О качестве отмывки остатков флюса можно судить по изменению электропроводности дистиллированной воды, находящейся в емкости, в которую погружено контролируемое изделие. Этот способ обеспечивает высокую чувствительность и объективность показаний.

2. Пайка легких сплавов. Почти все флюсы, применяемые для пайки легких сплавов, относят к коррозионноактивным, они способствуют быстрому развитию электрохимической коррозии. Поэтому после пайки необходима тщательная отмывка в проточной горячей, а затем холодной воде. Для повышения качества отмывки и сокращения ее продолжительности рекомендуется применять ультразвук, особенно при наличии труднодоступных мест. Ультразвуковая очистка с частотами 17—22 кгц в течение 10—20 мин при трех-, пятикратном водообмене обеспечивает полное удаление флюса [12].

Рекомендуется после промывки погружать детали в 5%-ный раствор хромового ангидрида на 5—10 мин для пассивирования поверхности. Затем снова необходимы промывка в горячей воде и сушка нагретым воздухом. Состав пассивирующего раствора: калиевый хромпик 13 г, серная кислота 8 г, хлористый натрий 0,1 г, уксусная кислота 5 г, вода 0,1 л. Применяется также другой вид обработки: травление и пассивирование в 10%-ной азотной кислоте и 5—15%-ном растворе двуххромовокислого натрия в течение 5—10 мин, промывка в горячей воде при температуре 50—80° С, сушка струей горячего воздуха.

После пайки магниевых сплавов с флюсами типа Ф380МГ необходимо тщательное удаление остатков флюса, которое осуществляется погружением паяного изделия на 30—60 мин в кипящий раствор углекислой соды. Затем изделие промывают в 0,5%-ном растворе калиевого хромпика. Труднорастворимые остатки флюса удаляют в 1—2%-ном растворе хромового ангидрида путем погружения изделия на 8—10 мин, с последующей промывкой в горячей и холодной воде и сушкой горячим воздухом (60—70° С).

Аналогичные способы отмывки рекомендуются для удаления остатков флюсов при пайке титановых сплавов.

Низкотемпературная пайка металлов. Органические флюсы без добавления хлоридов металлов, как правило, некоррозионноактивны или очень слабоактивны. Их остатки можно не удалять с соединяемых поверхностей, что очень важно при проведении паяльных работ в приборостроении.

Флюсы, содержащие хлориды металлов, способствуют коррозионному разрушению паяных швов и должны быть тщательно удалены после пайки. Остатки канифольных флюсов удаляются после пайки с большим трудом, их обычно растворяют в спирте или смеси спирта с бензином. Водные растворы хлористых флюсов надежно удаляют промывкой изделия в горячей и холодной проточной воде. Особенно хорошие результаты дает ультразвуковая очистка.

ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ ДЛЯ ПАЙКИ

Пайка металлов в специальных газовых средах является прогрессивным технологическим процессом, лишенным основного недостатка флюсовой пайки — низкой коррозионной стойкости соединений из-за наличия остатков флюсов. Искусственные среды, используемые для пайки, можно разделить на три типа: нейтральные, активные и вакуум.

В качестве нейтральных атмосфер нашли применение такие газы как азот, аргон, гелий. Их роль в основном сводится к защите основного металла и припоя от окисления при нагреве в процессе пайки. В химическое взаимодействие с окисными пленками на поверхности металлов или с самими металлами нейтральные атмосферы не вступают. Удаление окисной пленки при высокотемпературном нагреве происходит в результате диссоциации окислов в среде, лишенной кислорода.

Аналогичное действие на окислы оказывает в процессе пайки вакуум, который нашел в последние годы широкое применение в качестве среды, используемой для пайки особо ответственных изделий.

Активные газовые атмосферы не только защищают металл и припой от окисления, но и вступают в активное химическое взаимодействие с окисными пленками на поверхности металлов. Продукты взаимодействия в результате этого удаляются, благодаря чему поверхность оказывается подготовленной под пайку.

Пайка в вакууме и в среде инертных газов. При нагреве устойчивость окислов снижается. По достижении определенной температуры окислы способны разлагаться на металл и кислород. На этом основано удаление окислов при пайке в вакууме и в нейтральных газовых атмосферах. Устойчивость окисла или температура его разложения определяется прочностью связи элементов в окислах. Прочность связи или способность к разложению окисла может быть приближенно оценена по теплоте образования окисла. Так, окислы благородных металлов имеют невысокие значения теплоты образования и наиболее легко разлагаются при нагреве. Окислы же легких металлов имеют наибольшую прочность связи элементов в окислах и наиболее трудно поддаются диссоциации при нагреве. Данные по теплоте образования и температуре диссоциации окислов в атмосфере воздуха приведены в табл. 10 [5].

10. Теплота образования и температура разложения окислов в атмосфере воздуха некоторых металлов, нашедших применение в практике пайки

Окисел	Теплота образования, ккал/моль	Температура полного разложения, °С	Окисел	Теплота образования, ккал/моль	Температура полного разложения, °С
PtO ₂	—	300	PbO	—13,7	2348
Ag ₂ O	7,3	300	NiO	57,5	2751
Au ₂ O	—19,3	250	ZnO	83,2	3817
CdO	—61,1	900	FeO	64,3	3000
Cu ₂ O	40	1835	MnO	—34,6	3500

Для большинства металлов температура разложения окислов на воздухе значительно превышает температуру их плавления и даже кипения. Для того чтобы снизить температуру разложения окислов до приемлемых значений, необходимо снизить содержание кислорода в окружающей металл атмосфере. Каждой температуре отвечает свое равновесное значение парциального давления кислорода, которое принято называть упругостью диссоциации окисла, т. е. это такое наименьшее давление кислорода, при котором возможно при данной температуре разложение окисла. Чем выше упругость диссоциации окисла, тем при большем содержании кислорода в окружающей атмосфере возможно разложение окисла, и наоборот. Таким образом, окислы серебра и золота обладают высокой упругостью диссоциации, окислы алюминия и магния имеют низкую упругость диссоциации.

Зависимость упругости диссоциации от температуры выражается уравнением

$$\lg p_{O_2} = - \frac{Q_v}{4,571T} + 1,75 \lg T + 2,8,$$

где Q_v — теплота диссоциации окисла на 1 моль кислорода; p_{O_2} — упругость диссоциации окисла; T — температура К.

На основании этой формулы построены (показанные на рис. 1) кривые зависимости упругости диссоциации окислов некоторых элементов от температуры. Область температур и давлений ниже равновесной кривой отвечает условиям разложения окислов, область температур и давлений выше равновесия соответствует условиям окисления металла.

При неизменном парциальном давлении кислорода в газовой среде увеличение температуры нагрева смещает равновесие в сторону разложения окислов. При постоянной температуре уменьшение парциального давления кислорода также спо-

способствует диссоциации окисла и наоборот. Следовательно, увеличение температуры пайки и снижение содержания кислорода в окружающей среде приводит к более полному удалению окислов и более высокому качеству пайки.

Значительное снижение содержания кислорода в среде, используемой для пайки, может быть достигнуто созданием вакуума и заполнением пространства, в котором

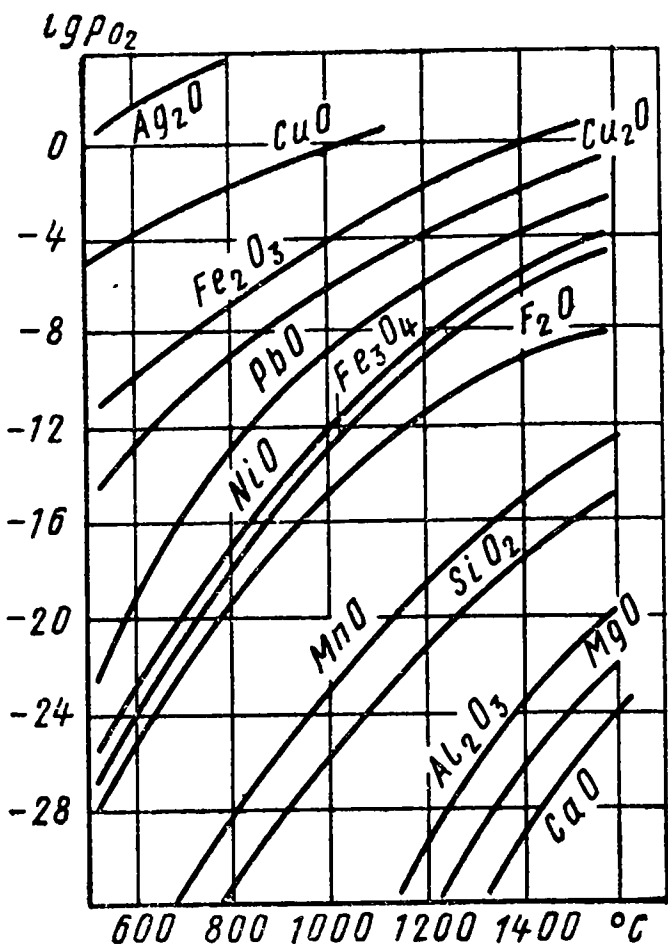


Рис. 1. Кривые упругости диссоциации окислов некоторых элементов

ведется пайка нейтральным газом. Если эту операцию повторить многократно, то можно снизить парциальное давление кислорода, азота и паров воды в камере пайки до значений, отвечающих высокому вакууму, что позволяет успешно производить пайку труднопаяемых металлов.

Очевидно, что при пайке в вакууме процесс диссоциации окислов не является единственным процессом, приводящим к удалению окисных пленок с паяемой поверхности. Если исходить только из теоретических расчетов и пользоваться данными номограммы (см. рис. 1), то для пайки таких металлов как титан и хром, требуется необычайно высокие значения вакуума, совершенно не достижимые на практике (например, для разложения TiO_2 требуется степень разрежения, соответствующая 10^{-28} мм рт. ст.), в то время, как известно, что пайку титана и его сплавов успешно осуществляют в среднем вакууме при температурах порядка $1100-1200^{\circ}C$. То же самое относится и к легированным сталям. Приведенные примеры свидетельствуют о протекании дополнительно к процессу диссоциации явлений, способствующих

удалению окислов и при более высоких парциальных давлениях кислорода в среде. В табл. 11 приведены значения вакуума, необходимого для разложения окислов некоторых металлов (по расчету).

11. Степень разрежения, необходимая для разложения окисла [7]

Окисел металла	Тем- пера- тура, °C	Степень разрежения, мм рт. ст.		Окисел металла	Тем- пера- тура, °C	Степень разрежения, мм рт. ст.	
		расчет- ная	применяемая на практике			расчет- ная	применяемая на практике
FeO	1150	10^{-10}	Сплавы хрома с железом и никелем паяют при 10^{-4}	SiO	1150	10^{-19}	— 10^{-4} Алюминий в вакууме не паяется
Cr ₂ O ₃	1150	10^{-15}		TiO ₂	1150	10^{-21}	
				Al ₂ O ₃	1150	10^{-27}	
MnO	1150	10^{-18}	—				

Процессами, способствующими удалению окисных пленок в процессе пайки, являются также возгонка окислов и их растворение в расплаве припоя и основном металле. При высоких температурах пайки удаление окислов возможно за счет испарения. Так, медь и серебро, часто употребляемые в качестве составляющих припоев, интенсивно растворяют кислород. Серебро при температуре $1000^{\circ}C$ способно растворить 2 атомн. % кислорода. В жидкой меди при температуре $1200^{\circ}C$ растворяется 5,7 атомн. % кислорода. Наиболее интенсивно растворяется окисная пленка в титане при температуре выше $700^{\circ}C$.

В вакууме можно паять не все металлы, так как некоторые из них заметно испаряются при нагреве, особенно цинк, кадмий, марганец, медь, серебро и т. п. (табл. 12).

12. Температура испарения некоторых элементов в вакууме [5]

Элемент	Тем- пера- тура пла- вле- ния, °C	Температура заметного испарения, °C, при раз- режении, мм рт. ст.		Элемент	Тем- пера- тура пла- вле- ния, °C	Температура заметного испарения, °C, при раз- режении, мм рт. ст.	
		10 ⁻²	10 ⁻¹			10 ⁻²	10 ⁻¹
Медь	1083	946	1035	Свинец	328	433	548
Серебро	961	763	848	Ванадий	1697	1456	1536
Бериллий	1284	942	1029	Ниобий	2500	2124	2355
Магний	651	287	331	Тантал	2996	2407	2599
Цинк	419	211	248	Хром	1900	907	592
Кадмий	321	148	180	Молибден	2622	1923	2090
Алюминий	660	724	808	Вольфрам	3382	2554	2767
Индий	157	667	746	Марганец	1244	717	791
Углерод	3214	2129	2288	Железо	1535	1094	1195
Кремний	1410	1024	1116	Кобальт	1478	1249	1362
Титан	1965	1134	1249	Никель	1455	1157	1257
Цирконий	2127	1527	1660	Палладий	1555	1156	1271
Олово	232	823	922				

Принято считать, что с увеличением степени разрежения улучшаются условия смачивания металлов жидкими припоями, однако показано [12], что наилучшие условия для смачивания меди и армко-железа создаются при степени разрежения 10⁻² мм рт. ст. При таком вакууме имеют место максимальная площадь растекания припоев и минимальная температура начала растекания. С увеличением степени разрежения от 10⁻² до 10⁻⁵ мм рт. ст. площадь растекания уменьшается и температура начала растекания повышается. Эти данные представляют большой интерес, так как указывают на возможность успешного проведения пайки при средних степенях разрежения без высокого вакуума, требующего сложного оборудования и больших затрат времени.

Основными достоинствами пайки в вакууме являются высокая плотность металла шва, хорошее качество поверхности и товарный вид изделия. Недостатком пайки в вакууме является сложность и высокая стоимость оборудования и большая длительность процесса.

В качестве нейтральных атмосфер для пайки используют инертные газы: аргон, гелий и азот.

Марки аргона по ГОСТ 10157—73 приведены в табл. 13.

Аргон всех трех марок применяют при пайке жаропрочных и нержавеющей сталей, вольфрама титана и других металлов. Для пайки титановых сплавов предпочитают аргон марки А, для сталей может быть использован аргон марок Б и В. Аргон всех трех марок может быть использован для пайки без дополнительной очистки от кислорода и влаги.

Пайка в среде инертных газов обычно производится в контейнере при постоянной продувке. Продувка камеры пайки аргоном, подаваемым под некоторым избыточным давлением, необходима потому, что поток аргона в этом случае уносит с поверхности паяемой детали и из камеры пайки кислород и другие газообразные продукты, образующиеся при диссоциации окислов и других соединений. В случае пайки

13. Аргон

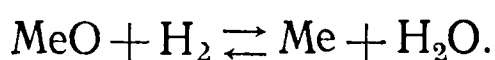
Марка	Аргон, %, не менее	Азот	Кисло- род	Влага
		%, не более		
А	99,99	0,01	0,003	0,03
Б	99,96	0,04	0,005	
В	99,90	0,10		

в застойной газовой среде повышение парциального давления кислорода у поверхности паяемой детали может вызвать прекращение процесса диссоциации.

В ряде случаев дефицитные аргон и гелий могут быть с успехом заменены более дешевым и доступным азотом. В частности, азот в качестве нейтральной атмосферы может быть использован для пайки меди, ее сплавов и для пайки сталей при относительно невысоких температурах: для меди 750—800° С, для стали до 1200° С. Недостатком азота является образование хрупких нитридов на поверхности некоторых сталей. Это опасно в случае пайки тонкостенных изделий, которые при этом теряют прочность.

Пайка в активных газовых средах. Применение восстановительных газовых атмосфер для пайки основано на протекании реакций восстановления металла из окисла, кислород связывается газом-восстановителем, а получающийся продукт удаляется из камеры пайки потоком свежей атмосферы.

В качестве восстановительных газовых сред используют водород и окись углерода, а также их смеси с азотом. Очищенный от примесей паров воды и других газов водород является очень активным восстановителем и действует на окислы металлов по реакции



Водород гораздо более активный восстановитель, чем окись углерода. Так, например, окислы железа восстанавливаются в водороде примерно в 20 раз быстрее, чем в окиси углерода при 500° С, и в 10 раз быстрее при 300° С. Недостатком водорода является взрывоопасность, ограничивающая его применение.

На скорость восстановления окислов металлов большое влияние оказывают кислород, попадающий в камеру пайки с газовой средой из-за подсоса воздуха, выделения кислорода из металла и т. п., а также скорость удаления продуктов реакции восстановления. В присутствии паров воды скорость протекания этой реакции может стать равной нулю задолго до установления равновесного состава газовой фазы.

Константу равновесия реакции восстановления можно записать в виде

$$K_p = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}},$$

где p_{H_2} и $p_{\text{H}_2\text{O}}$ — парциальные давления водорода и водяного пара.

При увеличении константы равновесия, т. е. при увеличении содержания водорода в газовой среде или уменьшении паров воды, реакция смещается в сторону восстановления металла из окислов. И наоборот, при уменьшении содержания водорода и увеличении содержания паров воды начинается окисление металла. Повышенное содержание влаги в среде водорода требует повышения температуры пайки. На практике парциальное давление водяного пара в газовой среде принято выражать через экспериментально определяемую точку росы. Точкой росы называется температура конденсации влаги, содержащейся в данной газовой атмосфере. На рис. 2 приведены кривые зависимости точки росы водорода от температуры обратимых реакций восстановления окислов. Значения точек росы и температур, расположенные правее кривых, отвечают условиям восстановления окислов, левее — условиям окисления.

Косвенно, сравнивая теплоту образования окисла и водяного пара, можно получить сведения об активности восстановления водородом окислов металлов. Если теплота образования окисла меньше, чем у водяного пара (115,6 ккал на 1 моль O_2), то он восстанавливается легко, в противном случае с трудом или вообще не восстанавливается.

По данным теплот образования окислов чистых металлов можно сделать предварительное заключение о возможности пайки в восстановительной среде сплавов на их основе. Так, сплавы, на поверхности которых образуются окислы MgO , TiO_2 , Al_2O_3 , BeO , не могут паяться в водородной среде. Сплавы, на поверхности которых образуются окислы, содержащие Cr_2O_3 , требуют применения очень сухих восстановительных атмосфер.

Наиболее легко осуществляется в водороде пайка низкоуглеродистых сталей. Так, при температуре пайки 850°C и более точка росы должна составлять $-25 \div -45^{\circ}\text{C}$. При пайке нержавеющей стали типа 12Х18Н9Т при температурах выше 1200°C точка росы должна составлять -60°C и ниже.

Кроме указанных сталей пайке в водороде подвергают также высокоуглеродистые стали, быстрорежущие и хромомолибденовые. Температура пайки указанных сталей лежит в пределах $1180\text{--}1200^{\circ}\text{C}$.

Для уменьшения взрывоопасности водород обычно применяют в смеси с азотом, эти смеси значительно дешевле. Так, при содержании 8% H_2 и менее смесь становится невзрывоопасной, но гораздо менее активной.

Азотоводородные смеси готовят либо путем смешения технических азота и водорода, либо путем разложения газообразного аммиака. Диссоциированный аммиак нашел широкое применение в качестве восстановительной атмосферы при пайке. Он получается в специальных катализаторах при нагреве газообразного аммиака при температуре 535°C по реакции



Подобная смесь содержит 75% водорода и 25% азота по объему. После тщательной осушки такая газовая среда обладает высокими восстановительными свойствами. В ней успешно идет удаление окислов даже со сталей, легированных хромом, марганцем, кремнием.

Аммиак, используемый для приготовления подобной среды, транспортируют в баллонах в жидком состоянии. При пайке один баллон аммиака способен заменить 19 баллонов водорода той же емкости под давлением 150 кгс/см^2 . Следовательно, применение аммиака не только менее опасно, но и более выгодно в экономическом отношении.

И все же из-за высокого содержания водорода диссоциированный аммиак не считается безопасной атмосферой. Для уменьшения содержания водорода диссоциированный аммиак иногда подвергают частичному сжиганию в смеси с воздухом или разбавляют азотом.

Более рентабельно получение азотоводородных смесей с низкой концентрацией водорода путем добавления к азоту небольшого количества водорода. Это имеет смысл особенно в тех случаях, когда азот получают на самом предприятии в качестве побочного продукта при выделении кислорода.

Азотоводородные смеси, полученные указанным путем, обычно содержат значительное количество влаги и следов кислорода, и поэтому их используют для пайки низкоуглеродистых сталей или подвергают дополнительно осушке и очистке.

Наряду с водородом и диссоциированным аммиаком широкое применение при пайке нашли газовые среды, представляющие собой продукты неполного сгорания высококалорийных газов в смеси с воздухом. Для этой цели используют природный газ, генераторный газ, пропан и другие горючие газы.

Состав газовой атмосферы можно регулировать, меняя соотношение горючего газа и воздуха в сжигаемой смеси. Более высокими восстановительными свойствами обладают атмосферы, полученные путем сжигания горючих газов при высокой температуре в присутствии катализаторов. Так как в этом случае сжигание происходит с поглощением тепла, подобные газовые смеси принято называть эндотермическими атмосферами.

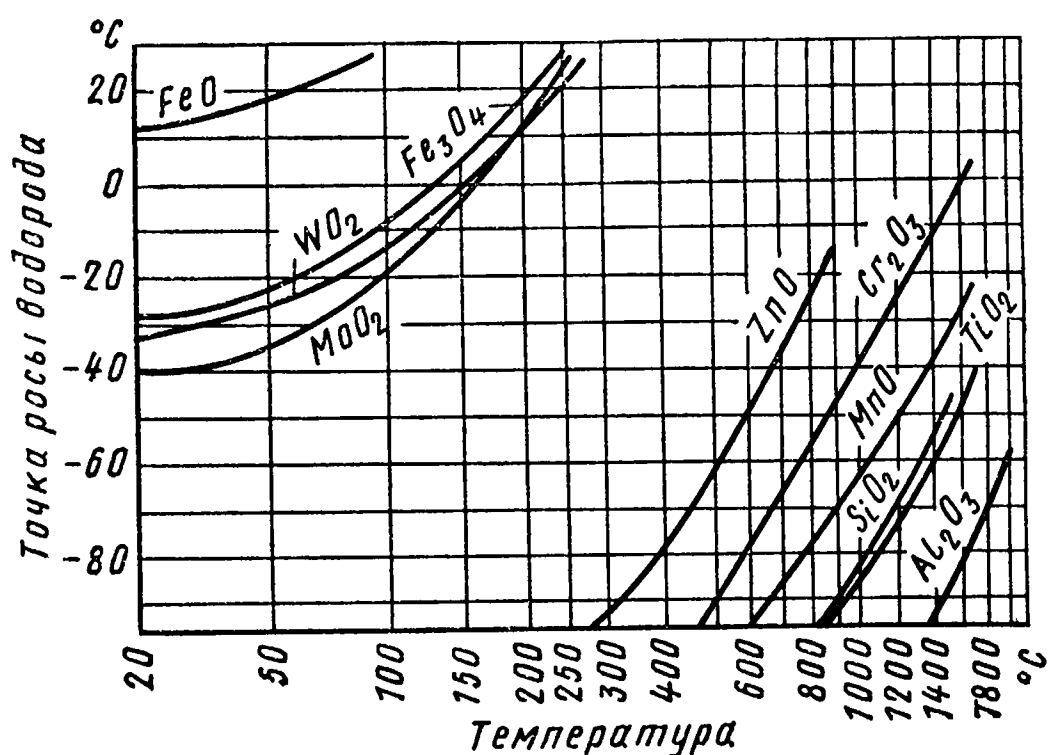


Рис. 2. Зависимость точки росы водорода от температуры обратимых реакций между окислами металлов и водородом

14. Восстановительные газовые атмосферы, применяемые для пайки металлов

Газовая среда	Условное обозначение среды	Метод приготовления	Химический состав, % по массе					Точка росы, °С	Область применения	
			H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂		Припой	Паяемые материалы
Водород	—	Из баллонов с осушкой	100	—	—	—	—	—60 ÷ —80	Медь, латунь, медно-фосфорные и серебряные	Медь, латунь, стали всех марок, жаропрочные сплавы, монель-металл
Диссоциированный аммиак	ДА	Диссоциация аммиака с последующей осушкой	75	—	—	—	25	—40 ÷ —60	То же и припой на никелевой основе	Медь и ее сплавы, никель и его сплавы, углеродистые, низколегированные и нержавеющей стали
Продукты неполного сжигания аммиака	ПСА-0,8	Частичное сжигание при $\alpha = 0,7 \div 0,9$ диссоциированного аммиака с глубокой осушкой	7—20	—	—	—	Ост.	—20 ÷ —40	Медь и припой на ее основе	Низкоуглеродистые и легированные стали
Продукты сгорания природного газа	ПСО-0,6	Частичное сжигание при $\alpha = 0,6$, очистка от CO ₂ , осушка	16	10	0,1	1,5	Ост.	—40		Малоуглеродистые и слаболегированные стали
Продукты сжигания природных газов (науглероживающая среда)	—	Сжигание природных газов с малым количеством воздуха	38—40	17—15	—	—	41—45	—40		Медь и ее сплавы, никелевые сплавы, монель-металл, легированные стали
Продукты полного сжигания природного газа (обезуглероживающая среда)	—	—	14—15	9—10	4—7	—	Ост.	—7	То же и серебряные припои	Средне- и высокоуглеродистые стали, легированные стали
Продукты частичного сжигания природного газа	—	Сжигание при $\alpha = 0,6$ в присутствии никелевого катализатора с обогревом > 1000 °С	20	20	0,2	1	Ост.	—25		
Генераторный газ из антрацита, очищенный от CO ₂ этаноламинами	ГГО	—	12	25	0,2	1—2	Ост.	—40		
Эндогаз	КГ-ВО	Частичное сжигание при $\alpha = 0,25$	40	21	0,5	2	Ост.	—40		

Примечание. α — коэффициент избытка воздуха. Ост. — остальное.

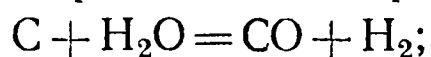
Температуру катализатора и состав смеси подбирают так, чтобы происходило разложение углеводородов при неполном сгорании. Основными составляющими таких сред являются водород, окись углерода и азот.

Составы наиболее употребительных газовых сред приведены в табл. 14.

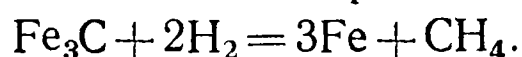
Воздействие газовых сред на свойства основного металла. При пайке углеродистых сталей в активных газовых средах возможно обезуглероживание поверхности стали вследствие [9]:

выгорания углерода с поверхности;

взаимодействия углерода с парами воды по реакции



взаимодействия водорода с цементом по реакции



Обезуглероживание усиливается с повышением температуры и степени влажности среды. Для предотвращения сильного обезуглероживания при пайке сталей нужно применять сухие атмосферы, содержание паров воды в которых не превышает 0,1%. Однако полностью предотвратить обезуглероживание не удастся.

В процессе нагрева металла в водородосодержащей атмосфере кроме обезуглероживания происходит растворение водорода в расплавленном припое, основном металле, образование на поверхности металлов гидридов и т. д.

Очистка газов от примесей кислорода и паров воды. Недостатком способа удаления окислов в газовых средах является высокая температура пайки: 1100—1150° С для углеродистых сталей, 1150—1200° С для легированных сталей, 1200—1220° С для жаропрочных сплавов. Относительно низкие восстановительные свойства газов, применяемых для пайки, объясняются наличием в них значительного количества примесей кислорода и паров воды. Для повышения активности восстановительных сред и для снижения температуры пайки необходимо производить тщательную очистку их от паров воды и кислорода.

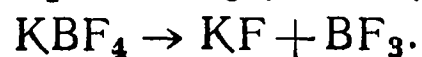
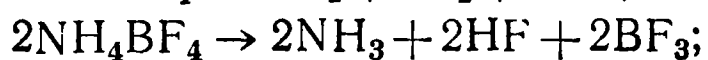
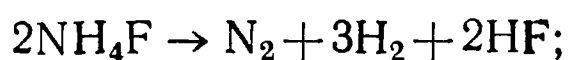
Для осушки газов применяют адсорбенты типа силикагеля и алюмогеля. Силикагель обеспечивает получение точки росы —40° С, алюмогель —60° С. Для более глубокой осушки газовые среды дополнительно пропускают через фосфорный ангидрид, смешанный со стеклянной ватой. При этом достигается точка росы ниже —80° С. Еще более низкую точку росы до —100° С обеспечивает применение палладиевых катализаторов с последующим прохождением газа через активированный окисел алюминия.

Содержание кислорода в восстановительных газах достигает 0,1—0,5% и выше. Очистку газов от кислорода можно осуществить химическими поглотителями или каталитическим способом. В качестве активных поглотителей кислорода из газов служат желтый фосфор, губчатая медь, титановая губка и т. д.

При каталитическом способе очистки кислород благодаря действию катализатора связывается с водородом с образованием паров воды, которые затем удаляются путем осушки.

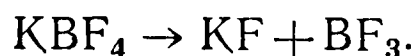
Наилучшими каталитическими свойствами обладают платина и палладий, но применение этих металлов для очистки атмосфер нерентабельно. Установлено, что высокими каталитическими свойствами обладает дешевый и доступный минерал дунит, который и был использован для очистки азото-водородных атмосфер [1]. Такая очистка удаляет примесь кислорода из газа и обеспечивает растекание серебряных припоев по поверхности легированных сталей при температурах 750—800° С.

Газообразные флюсы. К активным газовым средам относят газообразные флюсы. Они применяются как самостоятельные атмосферы и как активизирующая добавка к нейтральным и восстановительным атмосферам. Активными газообразными флюсами являются продукты распада фторидов и хлоридов металлов. Исходными продуктами для получения указанных сред служат фтористый аммоний NH_4F , фторборат аммония NH_4BF_4 , фторборат калия KBF_4 и др. Разложение их происходит при высокой температуре по следующим реакциям:



В среде фторида аммония производится пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов при температуре порядка 800°C . В процессе разложения фтористого аммония образуются фтористый водород и свободный водород. При этом происходит разложение окислов фтористым водородом и одновременно восстановление водородом. При получении газообразного флюса из фтористого аммония или фторбората аммония следует добиваться полного их разложения во избежание образования фтористого аммония из продукта неполного распада солей — аммиака и фтористого водорода. Этот фтористый аммоний высаживается на поверхности деталей, затрудняя процесс смачивания, и на всех рабочих поверхностях камеры пайки и трубопроводов. Полный распад фтористого аммония возможен при температуре $600\text{—}800^{\circ}\text{C}$, фторбората аммония — при температуре $850\text{—}950^{\circ}\text{C}$.

Фторборат калия полностью разлагается при температуре $800\text{—}900^{\circ}\text{C}$ по реакции



Высокой флюсующей активностью обладает как сам фторборат калия, так и продукты его распада. Трехфтористый бор может применяться как активная добавка к нейтральным средам путем введения его в камеру пайки из баллонов, в которых она поставляется. Такие смеси обеспечивают процесс пайки нержавеющей сталей и некоторых жаропрочных сплавов при температурах $1000\text{—}1200^{\circ}\text{C}$.

Для пайки металлов по никелевому, медному и серебряному покрытию низкотемпературными припоями при температурах $250\text{—}500^{\circ}\text{C}$ успешно можно применять газовую среду, состоящую из смеси азота или аргона и $0,1\%$ по объему паров хлористого аммония.

Известен опыт применения газовых сред для пайки нержавеющей сталей жаропрочными припоями, представляющих собой смесь нейтральных газов и паров щелочных металлов (лития, калия, натрия, рубидия, цезия).

В последнее время в качестве газообразных флюсов применяют пары магния, которые вводят в вакуумированное пространство при бесфлюсовой пайке алюминия и его сплавов припоями на основе алюминия [10]. При нагреве в атмосфере паров магния окисная пленка Al_2O_3 удаляется. На поверхности расплавленного припоя и основного металла образуется тонкий и рыхлый слой окиси магния, который не является препятствием для пайки, так как легко диспергирует и обеспечивает протекание процесса бесфлюсовой пайки.

К основным достоинствам пайки в газовых средах относятся отсутствие продуктов флюсования, хороший товарный вид продукции, равномерный нагрев деталей, широкие возможности механизации и автоматизации пайки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Есенберлин Р. Е. Опыт применения для пайки металлов газов, тщательно очищенных от примесей. — В кн.: Пайка металлов в производстве и перспективы ее развития. М., МДНТП, 1962, с. 41—62.
2. Есенберлин Р. Е. Пайка и термическая обработка деталей в вакууме. Л., «Машиностроение», 1972, 182 с.
3. Коршунов Б. Г., Сафонов В. В., Дробота Д. В. Диаграммы плавкости хлоридных систем. Л., «Химия», 1972, 383 с.
4. Краткий справочник химика Л., «Химия», 1972, 620 с.
5. Куликов И. С. Термическая диссоциация соединений. М., «Металлургия», 1969, с. 138—298.
6. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. М., «Машиностроение», 1967, с. 248—254.
7. Петрунин И. Е. Физико-химические процессы при пайке. М., «Высшая школа», 1972, с. 48—66.
8. Реакционно-флюсовая пайка алюминия в солевой ванне. — В кн.: Теоретические основы пайки металлов. М., ВЗМИ 1973, с. 71—74. Авт: Екатова А. С., Баранов Н. С., Парфенова Л. В. и др.
9. Рекомендации по выбору режима пайки в зависимости от температурного интервала активности флюсов. М., ВНИИНМАШ, 1971, с. 2—3.
10. Справочник по расплавленным солям Т. 1—2. Л., «Химия», 1972.
11. Суслов А. А., Лоцманов С. Н., Ермолов А. А. Пайка алюминиевых сплавов в парах магния. — В кн.: Пайка в промышленности. Ч. 1. М., МДНТП, 1970, с. 87—94.
12. Технология пайки узлов из алюминия титана и медных сплавов. — В кн.: Пайка в промышленности. Ч. 2. М., МДНТП, 1970, с. 55—57. Авт: Скляров И. К., Шлыков О. П., Кургузов Н. В. и др.
13. Шеин Ю. Ф., Петрунин И. Е. Влияние степени вакуумирования на растекаемость припоев. — В кн.: Пайка материалов в машиностроении. Т. 2. Рига, Литовский республиканский ИНТП, 1968, с. 78—87.
14. Хряпин В. Е., Лакедемонский А. В. Справочник паяльщика М., «Машиностроение», 1974, 327 с.

ПАЙКА В ПЕЧАХ

Пайка в печах наиболее полно соответствует технологическим особенностям процесса, обеспечивает высокое качество паяных соединений и позволяет наиболее широко применять механизацию и автоматизацию в производстве.

По методу нагрева печное оборудование можно разграничить на следующие основные группы: электропечи сопротивления, индукционные электропечи и установки, газопламенные печи.

В свою очередь, электропечи сопротивления и индукционные установки можно разделить на печи с контролируемой атмосферой, оснащенные газоприготовительными установками, и вакуумные печи, оснащенные средствами откачки.

Электропечи сопротивления с контролируемой атмосферой наиболее распространены.

ЭЛЕКТРОПЕЧИ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ АТМОСФЕРОЙ

Печи с контролируемой атмосферой оснащены устройствами для транспортирования паемых изделий, установками для приготовления контролируемой атмосферы и приспособлениями для сборки и пайки изделий. К печам с устройствами для транспортирования паемых изделий относят электропечи с инфракрасным нагревом ОКБ-1152 и ОКБ-1153 (для низкотемпературной пайки табл. 1).

1. Электропечи с инфракрасным нагревом

Параметры	ОКБ-1152	ОКБ-1153	Параметры	ОКБ-1152	ОКБ-1153
Установленная мощность, кВт	560	310	Расчетный удельный расход энергии, кВт·ч/т	4,84	2,3
Напряжение, В	380	380	Производительность печи, кг/ч	10 550	10 550
Число фаз	3	3	Расход азота, м³/ч	306	—
Температура рабочего пространства, °С	440	410	Размеры рабочего пространства, мм.		
Число тепловых зон	6	4	высота	1 400	1 400
Мощность холостого хода, кВт	250	70,4	ширина	1 400	1 400
Атмосфера печи	Азот	—	длина	21 890	15 800
Время разогрева печи до рабочей температуры, ч	1,43	1,2	Масса электропечи, т	36	33

Конструктивно обе электропечи аналогичны. Основные узлы печей: кожух (внутренний и наружный), нагреватели и транспортирующее устройство. Электропечь ОКБ-1152 оборудована также устройствами, связанными с подачей азота.

Нагревателями в обеих конструкциях печей служат радиационные трубы диаметром 114 мм с расположенными внутри нагревательными элементами из сплава 20Х25Н20.

Преимуществом электропечей с инфракрасным нагревом перед печами с конвективной теплопередачей является значительное сокращение времени нагрева изделий и равномерность температуры. Электропечи ОКБ-1152 и ОКБ-1153 разработаны ВНИИЭТО. Для непрерывного процесса высокотемпературной пайки изделий используют электропечи с роликовым подом или с ленточным конвейером.

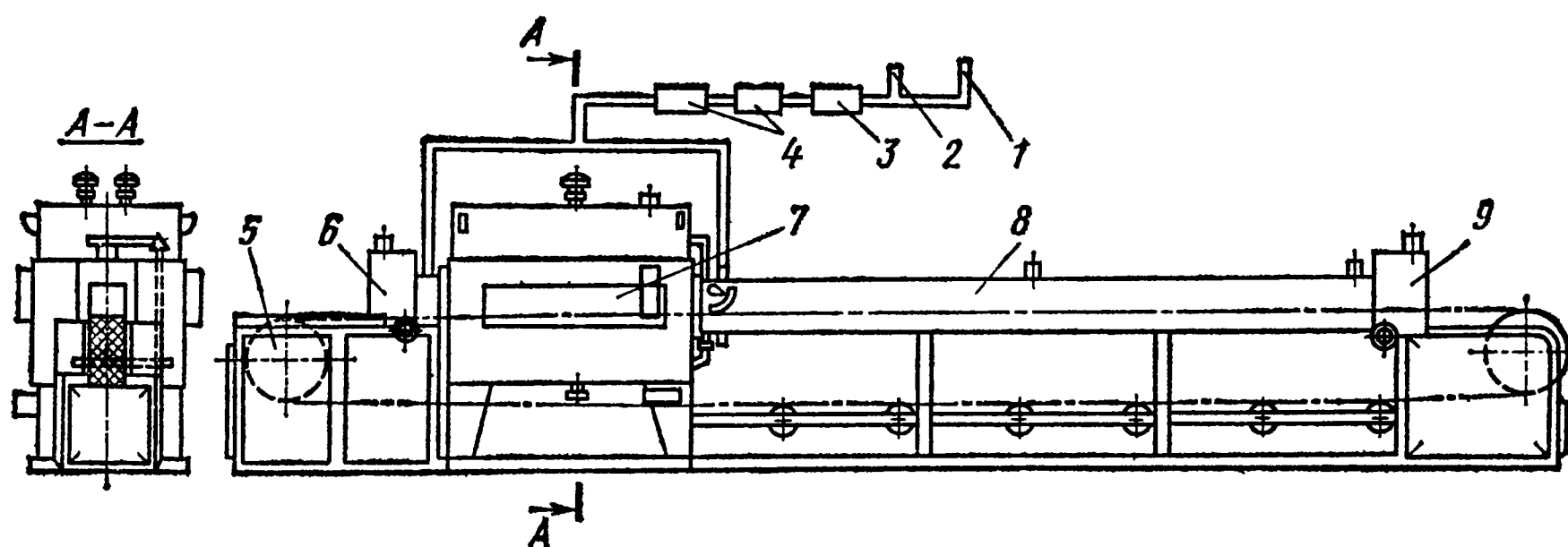


Рис. 1. Схема электропечи с ленточным конвейером

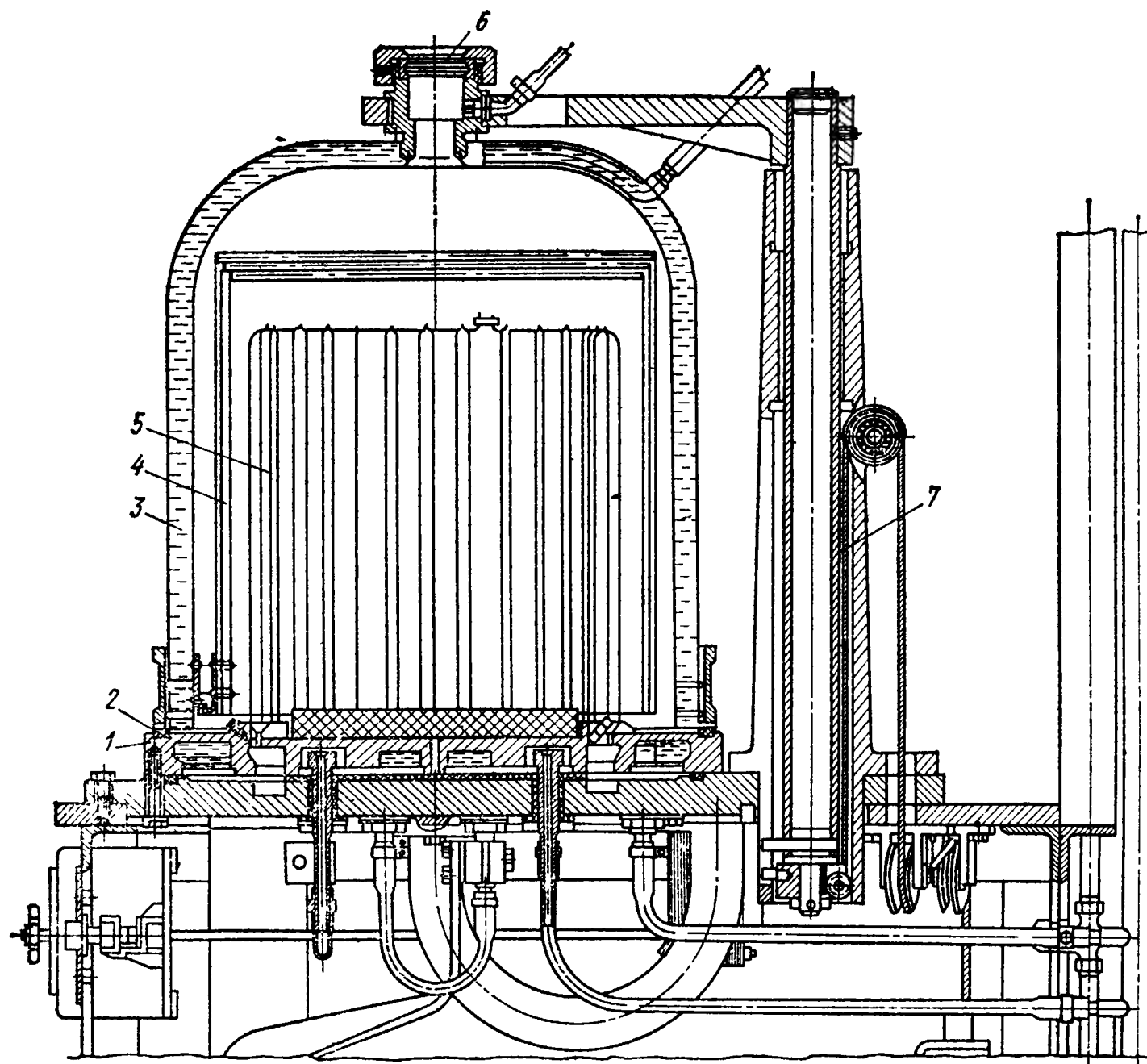


Рис. 2. Схема рабочей камеры колпаковой электропечи для пайки в контролируемой атмосфере

Печи с роликовым подом обычно выполняют трехкамерными (камеры для подогрева, пайки и охлаждения). При загрузке изделий в камеру подогрева в нее подают избыточное количество контролируемой атмосферы, препятствующей проникновению в нее воздуха.

Все камеры между собой разделены дверцами, которые автоматически открывают при перемещении паяемых изделий по роликовому поду.

Электropечи с ленточным конвейером также состоят из камеры предварительного подогрева 6 (рис. 1), камеры пайки 7 и камеры охлаждения 8. Паяемые изделия, подаваемые на подвесную ленту конвейера 5, последовательно проходят через всю печь. Контролируемая атмосфера готовится в специальной установке, от которой по трубопроводам 1 и 2 поступает в осушители 3, 4 и затем в пространство печи. Вход и выход 9 печи постоянно открыты, так как конвейер непрерывно перемещается [21]. Попадание воздуха в рабочее пространство предотвращают избыточным давлением контролируемой атмосферы. В случае применения восстановительной атмосферы газ на входе и выходе печи перемешивается с воздухом и сгорает. Пламя создает заслон, предупреждающий проникновение воздуха в печь.

Наряду с электropечами непрерывного действия для пайки изделий широко используют колпаковые и в некоторых случаях шахтные печи. Колпаковые и шахтные печи отличаются от печей непрерывного действия возможностью производить пайку при более высоких температурах, поскольку в печах с устройствами для транспортирования паяемых изделий максимально достигаемая температура 1150° С.

Колпаковые печи выпускают с одним или двумя рабочими колпаками. Печи состоят из следующих основных узлов: рабочей камеры, стола и пульта управления.

Рабочая камера (рис. 2) ограничена основанием 1, охлаждаемым водой, пропускаемой по каналам, и колпаком 3, между двойными стенками которого также циркулирует вода. В верхней части колпака имеется смотровое отверстие 6 (гляделка), закрытое кварцевым стеклом. Над отверстием установлено зеркало для наблюдения за процессом пайки. Для герметизации пространства колпака предусмотрена прокладка 2 из вакуумной резины, помещенной в кольцевом пазу основания. Контролируемую атмосферу подают через штуцер в верхней части колпака, выход газа через штуцер в основании печи. В случае применения восстановительной атмосферы газ на выходном штуцере сжигают. При загрузке и выгрузке изделий колпак поднимают и отводят в сторону с помощью подъемного устройства 7. Нагревательный элемент 5 в виде решетки закреплен в основании винтами. Для сокращения тепловых потерь печи предусмотрены экраны 4, выполненные в виде цилиндров из листовой жаростойкой стали. Напряжение на нагревателях повышают постепенно с помощью автотрансформатора, аналогично его снижают после пайки [27].

Большой производительности пайки достигают при использовании двухколпаковых электropечей СКБ-7001А с программным управлением [33].

Техническая характеристика электropечи СКБ-7001А

Рабочая температура, °С	1200	Установленная мощность, кВт	40
Максимальная температура (пик мощности), °С	1400	Напряжение питающей сети, В	380
Число фаз	3	Частота питающей сети, Гц	50
Число тепловых зон	1	Габаритные размеры печи, мм:	
Расход водорода (одного колпака), м³/ч	0,5	ширина	1740
Расход охлаждающей воды, м³/ч	1,0	длина	1800
Размеры рабочего пространства (одного колпака), мм:		высота	2050
диаметр	200	Масса печи, кг	2500
высота	300		

Печь СКБ-7001А снабжена электромеханическим приводом передвижения колпаков, системой автоматического регулирования теплового режима пайки по заданной программе с помощью потенциометра ПСР-1-08 и программного регулирующего устройства РУ-5-01. Питание печи осуществляется через силовой понижающий трансформатор типа ТСУ-50/0,5А, снабжение контролируемой атмосферой — автоматическое.

Электрические печи типа СКБ-7018, СКБ-7049 предназначены для пайки изделий в среде водорода или инертного газа [32]. Изделия загружают специальной руч-

ной тележкой, при помощи которой их устанавливают на керамическую подставку (днище) в печи СКБ-7018 и на вольфрамовую — СКБ-7049. Печь СКБ-7018 (рис. 3) оснащена молибденовыми экранами и стержневыми нагревателями. В крышку печи вмонтирован взрывозащитный клапан. Для наблюдения за процессом пайки печь снабжена гляделкой.

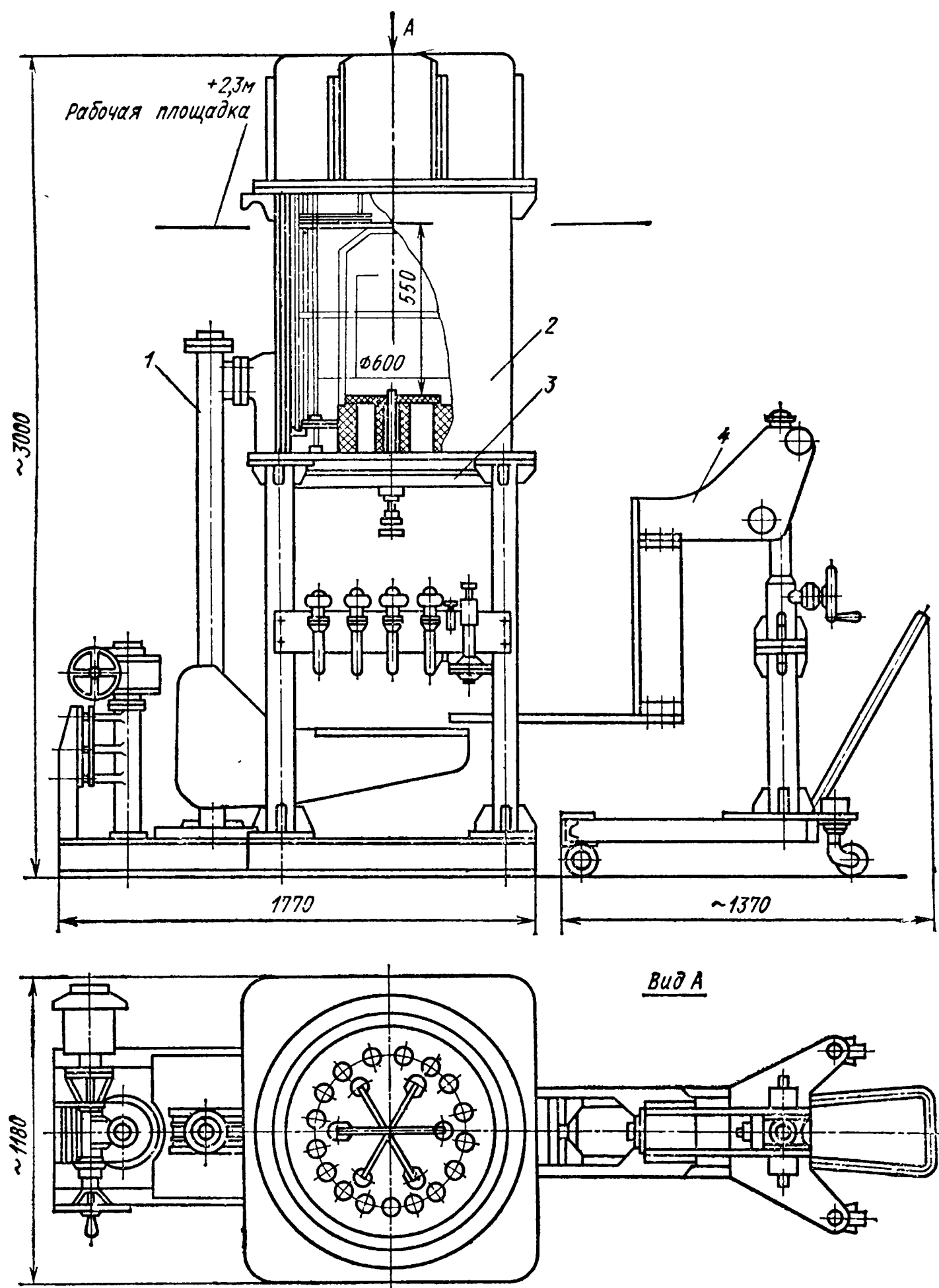


Рис. 3. Общий вид и габаритные размеры электропечи СКБ-7018:

1 — механизм подъема; 2 — нагревательная камера; 3 — днище; 4 — загрузочная тележка

Регулирование нагрева и охлаждения паяемых изделий производится по заданной программе. В случае падения давления водорода в объеме печи или прекращения его подачи рабочая камера автоматически заполняется азотом. Питание печи производится через два печных трансформатора ТНТ-100АО, включенных параллельно, и автотрансформатора АТМК-250/05.

Печь СКБ-7049 (рис. 4) имеет внутри корпуса шесть вольфрамовых, пять молибденовых и один из нержавеющей стали экранов. Нагревателями служат вольфрамовые стержни, один конец которых соединен с водоохлаждающими токопроводами, расположенными на крышке печи, а другой крепится к кольцу, служащему нулем звезды. В печи имеются предохранительные клапаны и гляделки для радиационного пирометра и визуального наблюдения за процессом пайки. Вольфрамово-рениевая термопара может свободно перемещаться по вертикали через герметичное

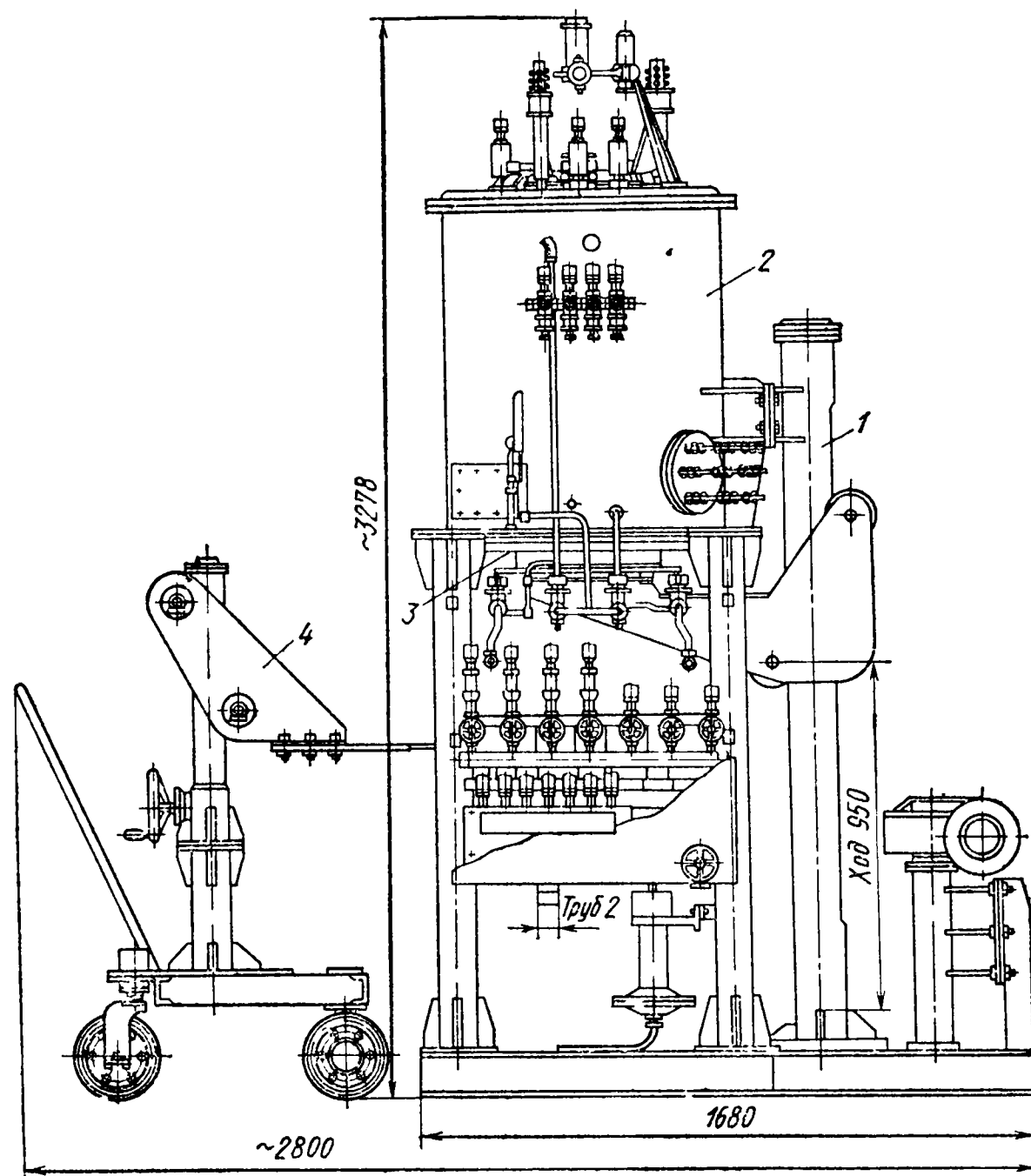


Рис. 4. Общий вид и габаритные размеры электропечи СКБ-7049:

1 — механизм подъема; 2 — рабочая камера; 3 — днище; 4 — загрузочная тележка

сальниковое уплотнение. При замере температуры до 1200°C датчиком служит термопара, в интервале температур $1200\text{—}2000^{\circ}\text{C}$ — радиационный пирометр. Термопару при этом удаляют из зоны высокой температуры.

Электроснабжение печи СКБ-7049 осуществляют через печной трансформатор ТСУ-20/05. Для плавного регулирования напряжения на нагревателях установлены три однофазных магнитных усилителя типа УСО-40.

Технические характеристики наиболее распространенных колпаковых печей приведены в табл. 2.

Для пайки изделий из углеродистых сталей и инструмента используют шахтные печи с контролируемой атмосферой. Регулирование температуры при нагреве и выдержке, например в шахтной печи типа СШЗ-25.50/10-Л1, осуществляется автоматически с программным управлением. Аналогичная печь типа ЗСШЗ-8.40/10 имеет пять зон, в которых регулирование температуры осуществляется как автоматически, так и вручную [36].

Технические характеристики некоторых шахтных печей приведены в табл. 3. Перечисленные выше шахтные печи разработаны НИИТВЧ.

2. Колпаковые электропечи для пайки изделий в атмосфере водорода

Тип печи и модель	Потребная мощность, кВт	Рабочая температура, °С	Тип нагревателей	Напряжение питающей сети, В	Расход газа, м³/ч	Размеры рабочего пространства, мм		Габаритные размеры: длина, ширина, высота, мм
						Диаметр	Высота	
Двухколпаковая печь СКБ-7001Б	27	1200	Молибденовые стержни	380	0,7	—	—	1730, 1810, 2180
Колпаковая печь СКБ-7018	200	1600	Вольфрамовые стержни	380/220	1,5	500	500	—
Колпаковая печь СКБ-7049	118	2000			1,0	200	300	—
Одноколпаковая печь ИО59.004	140	1200			1,0	510	800	2200, 1800, 3100
Одноколпаковая печь ИО59.005	250	1200	Молибденовые стержни	220/380	3,5*	670	1400	3930, 2400, 4270
Одноколпаковая печь ИО59.015	5	1300			0,125	130	160	745, 620, 1480
Одноколпаковая печь ЦЭП-241А	35	1150			0,05	210	300	1600, 870, 1680
Двухколпаковая печь ЦЭП-240А	20	1150	Молибденовые П-образные шпильки Молибденовые стержни	220	0,03	140	140	1650, 650, 2000
Двухколпаковая печь ЛМ-3360	20	1200			—	170	250	1200, 1000, 2100
Двухколпаковая печь ИО59.014	7	1300			0,125	130	160	745, 620, 1480

* За цикл.

3. Шахтные электропечи

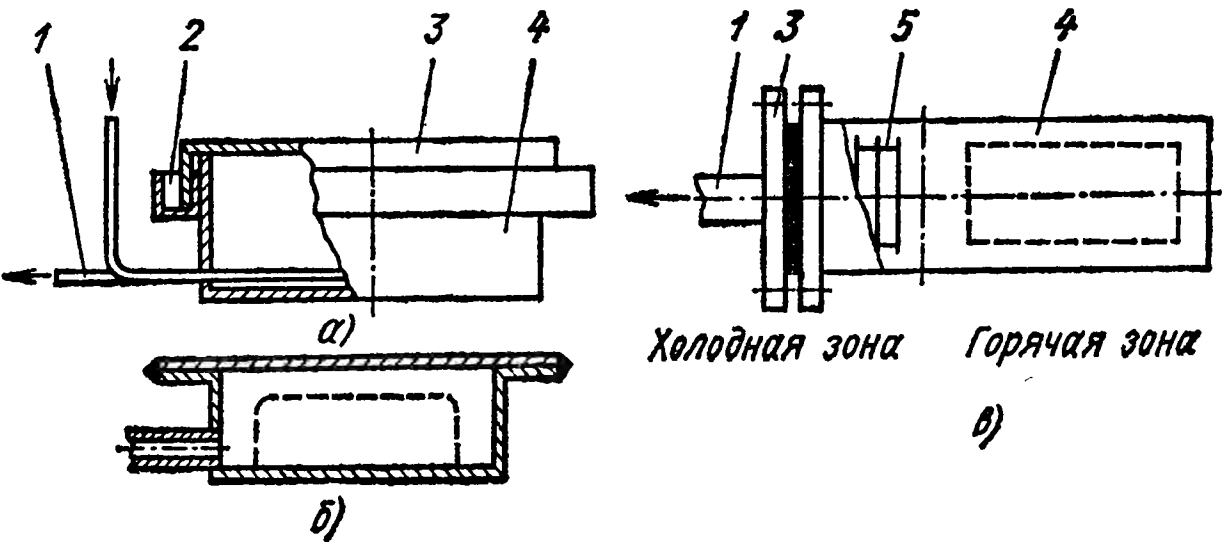
Параметры	СШЗ-25.50/10-Л1	ЗСШЗ-8.40/10	ОКБ-3176А
Мощность, кВт	600	336	285
Максимальная температура, °С	1000	1050	900
Масса садки, т	15	2	2,5
Размеры рабочего пространства, мм:			
диаметр	2500	800	1350
высота.	5000	4000	3000
Габаритные размеры, мм:	10 500×7300×8400	4730×2730×8220	5180×3020×930
Масса печи, т	50	18,5	23

Для пайки крупногабаритных изделий в контролируемой атмосфере применяют шахтные и камерные печи со специальными контейнерами, в которые подается газовая среда. Конструкция контейнеров для печной пайки показана на рис. 5.

В шахтных и камерных печах для пайки в контролируемой атмосфере используются жесткие контейнеры, которые изготавливают из жаростойких сталей и сплавов.

Контейнер (рис. 5, а), герметизированный засыпкой 2, состоит из собственно контейнера 4, крышки 3 и трубопроводов 1 для подачи и отвода газовой среды. В контейнере, показанном на рис. 5, б, после загрузки деталей крышку приваривают к фланцу контейнера. На рис. 5, в изображен жесткий цилиндрический контейнер 4 с водоохлаждаемой крышкой 3, которая уплотняется посредством эластичной прокладки. Патрубок 1 представляет собой систему из двух трубок различного диаметра (одна в другой), по которым осуществляется подача и отвод газозащитной среды.

Рис. 5. Жесткие контейнеры для пайки изделий в контролируемой атмосфере



Для уменьшения нагрева уплотнения на фланце контейнера установлены теплоизоляционные экраны 5.

Важную роль в конструкции контейнеров играет схема размещения трубки для отвода газовой атмосферы, так как при пайке необходимо полное удаление из объема контейнера воздуха. При использовании газовых сред легче воздуха (водород, диссоциированный аммиак и др.) выходную трубку располагают у дна контейнера. При применении защитных сред тяжелее воздуха (аргон, азот и др.) трубку для выхода газов размещают в верхней части контейнера. Физические свойства некоторых газов и паров приведены в табл. 4.

4. Физические свойства некоторых газов и паров [20]

Вещество	Молекулярный вес	Масса молекул $m \cdot 10^{-24}$, г	Средняя скорость молекул при 15 °С, км/с	Диаметр молекулы $\sigma \cdot 10^{-8}$, см	Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^{-8}$, кал/см $\times$ с $\cdot$ °С	Вязкость при 15 °С, мкП	Средний свободный путь при 15 °С и 1 мм рт. ст., см
Водород	2,02	3,35	1,74	2,74	0,416	87	8,97
Гелий	4,0	6,64	1,23	2,18	0,344	194	14,1
Пары воды	18,0	29,9	0,582	4,6	0,55*	93	3,18
Азот	28,0	46,5	0,467	3,75	0,057	173	4,77
Воздух	28,7	47,6	0,459	3,72	0,057	180	4,86
Кислород	32,0	53,1	0,437	3,61	0,057	200	5,15
Аргон	39,9	56,2	0,391	3,64	0,039	220	5,06

* При 100° С.

На рис. 6 показана камерная электропечь сопротивления ОКБ-1107, представляющая собой нагревательное устройство с автоматическим поддержанием в рабочем пространстве заданной температуры. Нагреватель — проволоочный из сплава Х20Н80.

Камерная высокотемпературная электропечь СНО-3.4,5.2/16 приведена на рис. 7. Теплоизоляция указанной печи выполнена из ультралегковесного кирпича, огнеупорная часть кладки — из высокоглиноземистого шамота.

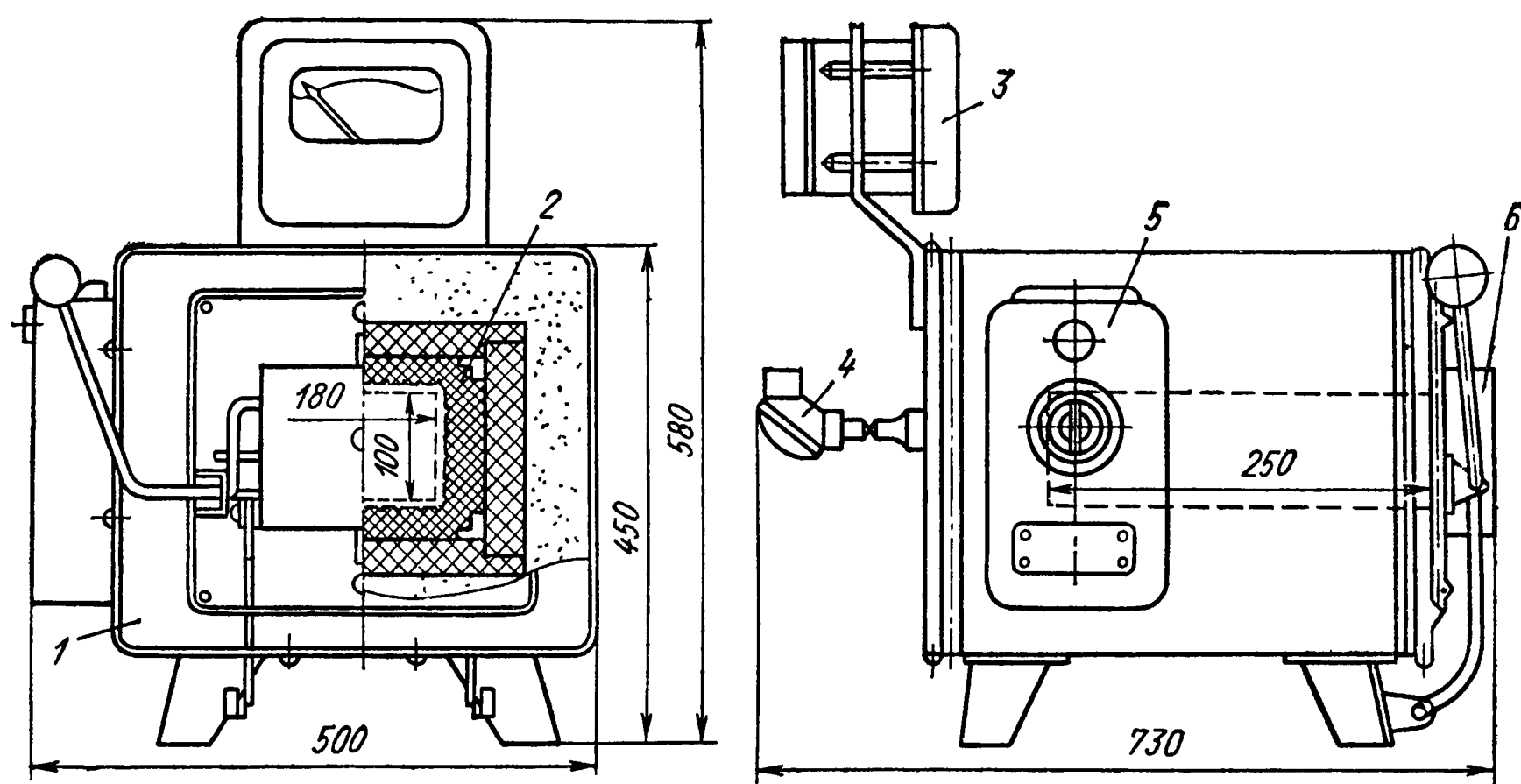


Рис. 6. Камерная электропечь сопротивления ОКБ-1107:

1 — каркас; 2 — камера нагрева; 3 — показывающий прибор, 4 — термопара; 5 — панель регулирования; 6 — дверца

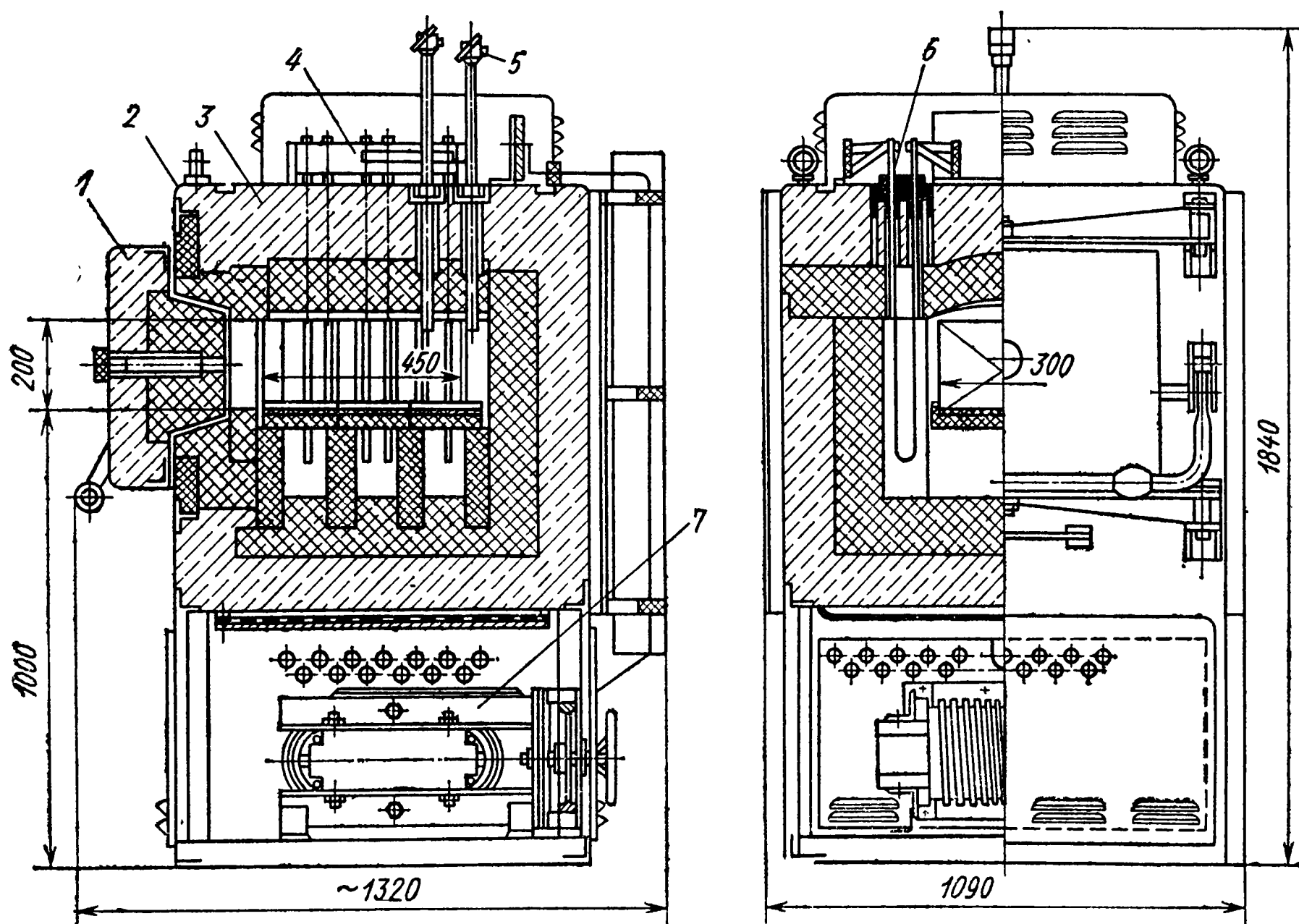


Рис. 7. Камерная высокотемпературная электропечь СНО-3, 4, 5.2/16:

1 — дверца; 2 — кожух; 3 — футеровка; 4 — монтаж приборов; 5 — термопара; 6 — нагреватель; 7 — трансформатор

Контейнер с паяемыми изделиями устанавливают в печь на карборундовую плиту. В печи установлено 12 V-образных нагревательных элементов типа ДМ 315/400 из дисилицида молибдена. Питание нагревателей осуществляется от сети через понижающий трансформатор ТСО-20БЗ. Температура в печи регулируется автоматически. На своде печи установлены две термодпары, одна термодпара дублирующая. Технические характеристики камерных печей приведены в табл. 5 и 6.

5. Камерные электропечи [13]

Параметры	ОКБ-1107	СНО-3.4.5.2/16	Параметры	ОКБ-1107	СНО-3.4.5.2/16
Мощность, кВт	3,0	18,3	Размеры рабочего пространства, мм:		
Напряжение, В:			длина	250	450
рабочее	220	75	высота	100	200
пусковое	—	30	ширина	160	300
Частота, Гц	50	50	Габаритные размеры, мм:		
Число фаз	1	1	длина	730	1320
Температура, °С:			ширина	500	1090
максимальная	1200	1600	высота	560	1840
рабочая	1100	1500	Масса печи, кг	68	1500

6. Камерные электропечи сопротивления [28]

Тип	Размеры рабочего пространства, мм			Рабочая температура, °С	Тип	Размеры рабочего пространства, мм			Рабочая температура, °С
	ширина	длина	высота			ширина	длина	высота	
СНЗ-2.5.5.0.1.7/12	250	500	170	1250	СНО-2.4.1.4/15	200	400	140	1450
СНЗ-5.0.10.3.2/12	500	1000	320	1250	СНО-4.8.2.6/16	400	800	260	1500
СНЗ-18.36.12/12	1800	3600	1200	1250	СНО-8.5.11.5/16	850	1100	500	1600
СНЗА-4.0.8.0.2.6/10	400	800	260	1000					

Примечание. Нагреватели в печах СНО-2.4.1.4/15, СНО-4.8.2.6/16 и СНО-8.5.11.5/16 из дисилицида молибдена. В остальных — металлические.

При высокотемпературной пайке в электропечах сопротивления важную роль играет стойкость нагревательных элементов. Наиболее надежными являются нагреватели из дисилицида молибдена. Для промышленных целей Кировоканский завод высокотемпературных нагревателей выпускает нагреватели из дисилицида молибдена прямой и V-образной формы. На поверхности нагревателей при температуре 1200—1250° С образуется стекловидный газонепроницаемый слой двуокиси кремния, который позволяет использовать нагреватели на воздухе и в агрессивных средах до температуры 1700° С. Типоразмеры выпускаемых нагревателей из дисилицида молибдена приведены в табл. 7.

7. Типоразмеры нагревателей из дисилицида молибдена

Условное обозначение	Длина рабочей части, мм	Длина вывода, мм	Масса, кг	Условное обозначение	Длина рабочей части, мм	Длина вывода, мм	Масса, кг
Прямые							
ДМ 100/125	100	125	0,0150	ДМ 180/350		350	0,460
ДМ 100/150		150	0,170	ДМ 180/400		400	0,520
ДМ 150/150	150	150	0,180	ДМ 200/200	200	200	0,280
ДМ 180/150		150	0,200	ДМ 200/250		250	0,340
ДМ 180/185	180	185	0,230	ДМ 225/560	225	560	0,700
ДМ 200/200		200	0,250	ДМ 250/185		185	0,300
ДМ 200/250	200	250	0,300	ДМ 250/250	250	250	0,360
ДМ 200/350		350	0,420	ДМ 250/300		300	0,400
V-образные				ДМ 250/400		400	0,530
ДМ 150/300	150	300	0,390	ДМ 315/300		315	300
ДМ 150/500		500	0,610	ДМ 315/350	350		0,490
ДМ 180/150	180	150	0,230	ДМ 315/400	400	400	0,550
ДМ 180/185		185	0,200	ДМ 315/500		500	0,640
ДМ 180/250		250	0,320	ДМ 400/250		250	0,400
ДМ 180/300		300	0,400	ДМ 400/400		400	0,570
				ДМ 400/500		500	0,680

Примечание Диаметр рабочей части нагревателя 6,0 мм, диаметр вывода 12 мм. Потребителем могут быть заказаны V-образные нагреватели с отогнутыми рабочими частями.

УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ АТМОСФЕР

Азотно-водородные смеси, получаемые диссоциацией аммиака, не должны содержать недиссоциированный аммиак, так как при соединении с кислородом он образует окись азота, содержание которой выше 0,2% приводит к обезуглероживанию сталей. Для очистки от недиссоциированного аммиака газовую смесь после

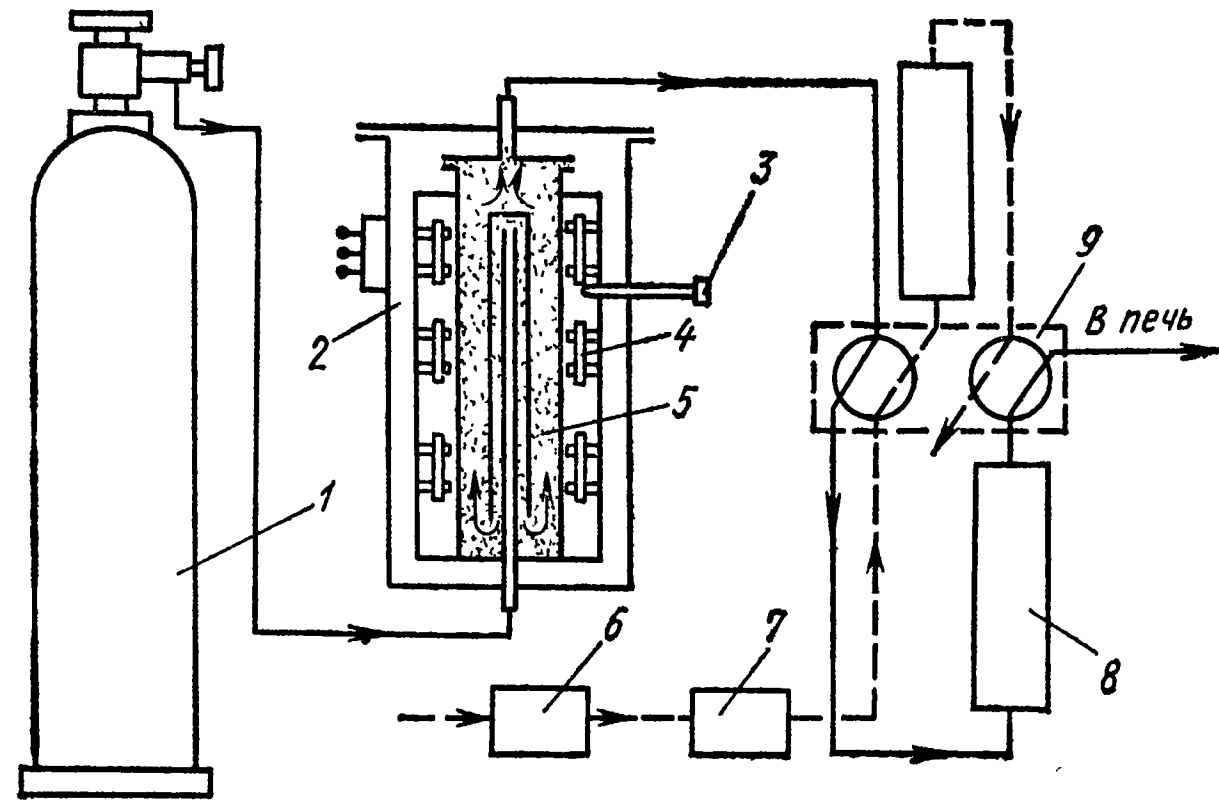


Рис. 8. Схема установки для диссоциирования аммиака:
1 — баллон с аммиаком; 2 — диссоциатор; 3 — термопара; 4 — нагреватель; 5 — катализатор; 6 — воздухонагреватель; 7 — компрессор; 8 — осушители; 9 — перепускной кран

диссоциации пропускают через сосуд с водой. Принципиальная схема установки для диссоциирования аммиака показана на рис. 8.
Осушитель представляет собой два сосуда с силикагелем и алюмогелем, через которые поочередно проходит газ. В одном сосуде осушитель поглощает влагу рабочего газа, в другом — силикагель регенерируется горячим воздухом, поступающим из нагревателя 6 при помощи компрессора 7 через перепускной кран 9 [11].

Для получения контролируемой атмосферы промышленность выпускает установки типа ДА-30-С и ДА-60-С. Они предназначены для получения восстановительного газа путем диссоциации аммиака с последующим частичным сжиганием водорода и осушкой.

Жидкий аммиак из баллонов поступает в испаритель. Образующиеся пары аммиака проходят через реторту с катализатором, помещенную в диссоциаторе — шахтной электропечи. Из диссоциатора азотно-водородная смесь поступает в футерованную камеру сжигания. Соотношение расходуемого воздуха и газа при горении регулируется в зависимости от требуемого содержания водорода в защитной атмосфере (4—20%). Продукты сгорания поступают в блок охлаждения, а затем в силикагелевый осушитель, где влажность готовой атмосферы значительно снижается (точка росы —40 ÷ —50° С).

Состав получаемой контролируемой атмосферы: с частичным сжиганием водорода: 4—20% Н₂, остальное N₂; без сжигания водорода: 75% Н₂, 25% N.

На выходе из установки обеспечивается избыточное давление восстановительной атмосферы не менее 100—150 мм вод. ст.

Промышленные установки ДА-30-С и ДА-60-С отличаются высокой производительностью, обеспечивают получение восстановительной атмосферы постоянного состава с низкой влажностью.

В ряде случаев для пайки могут быть использованы генераторные газы, которые в зависимости от исходного продукта и способа получения содержат окись углерода, водород, азот и другие газы. Для повышения активности генераторного газа восстановительную зону генератора подогревают до 1000° С. В случае использования в качестве исходного продукта антрацита газ подвергают дополнительной очистке от СО₂ и Н₂S раствором этаноламинов.

Большое применение для приготовления восстановительных атмосфер находят природные газы, а также сжиженные углеводородные газы (пропан, бутан, изобутан и их смеси).

В промышленности для приготовления контролируемых газовых сред используют специальные установки, предназначенные для получения экзотермической контролируемой атмосферы. Для получения экзогаза углеводородные газы (городской, природный, пропан-бутановые смеси) сжигают с коэффициентом избытка воздуха α = 0,6 ÷ 0,9 (установка ЭК-125-М4).

При большем расходе газозащитной среды применяют аналогичную установку, но с большей производительностью типа ЭК-250-М2 (табл. 8). Обе установки

8. Установки для приготовления экзотермической контролируемой атмосферы

Параметры	ЭК-125-М4	ЭК-250-М2	ЭК-60-М1	ЭК-60-М2	ЭК-125-М3
Производительность, м³/ч	125	250	60	60	125
Мощность электрооборудования, кВт	4,5	7	1,7	15,4	4,5
Расход воды, м³/ч	10,5	17	5,5	6,0	10,5
Рабочая температура камеры сжигания, °С	1000—1200				
Избыточное давление, мм вод. ст:					
исходного газа	2500—3000				
экзотермического газа на выходе	≥ 100—150				
Точка росы (влажность газовой атмосферы), °С	20—30			—40 ÷ —60	20—30
Габаритные размеры, мм:					
длина	3950	4700	2900	2900	3800
ширина	2060	1850	1250	3650	1650
высота	2650	2250	2300	2405	2660
Масса, т	3,5	5,22	1,41	3,43	3,34

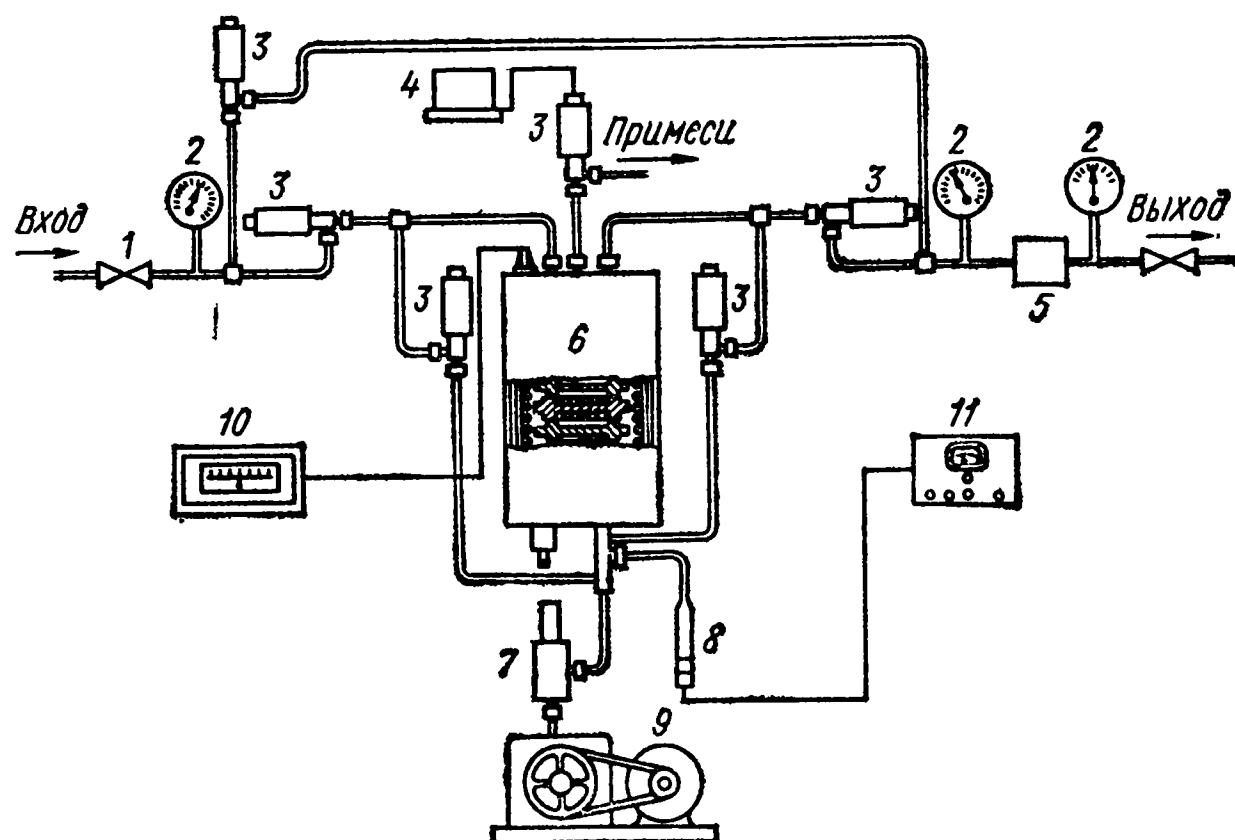


Рис. 9. Компоновочная схема установки УЧВ-2А:

1 — кран; 2 — манометры; 3 — электромагнитные клапаны; 4 — реле времени; 5 — редуктор; 6 — диффузионный элемент; 7 — азотная ловушка; 8 — термопарная лампа; 9 — форвакуумный насос; 10 — потенциометр; 11 — вакуумметр

малогабаритны, компактны, не требуют специальных фундаментов, удобны и просты в эксплуатации [6].

В производстве паяных изделий, когда не требуется большого расхода защитного газа, применяют установки с меньшей производительностью, которые монтируют непосредственно с нагревательным оборудованием.

Установку для получения экзотермического газа типа ЭК-60-М2 применяют при пайке черных и цветных металлов. Газ сжигается в футерованной камере с водоохлаждаемым кожухом. Полученный газ охлаждается и частично освобождается от водяных паров в холодильнике, представляющем собой водоохлаждаемую трубную решетку и влагоотделитель [7]. Установка снабжена дополнительно блоком осушки газа, позволяющим понизить точку росы готовой экзотермической атмосферы до $-40 \div -60^\circ \text{C}$.

Установка ЭК-125-М3 может работать совместно с установкой для осушки газа ОКБ-1349, которая также может быть использована для осушки азота и других газовых сред. В ней размещены два попеременно работающих силикагельных осушителя. После 8 ч работы силикагель регенерируют в течение этого же времени продувкой горячим воздухом из калорифера, смонтированного на общей раме с осушителями, и последующим охлаждением до температуры $20-25^\circ \text{C}$.

Технические характеристики установки ОКБ-1349

Производительность, м ³ /ч	125
Мощность, кВт	3,4
Масса силикагеля, кг	840
Габаритные размеры, мм:	
длина	2418
ширина	2400
высота	2855
Масса установки, т	2,36

Для пайки ответственных конструкций, особенно в электровакуумном производстве, широко применяют водород высокой чистоты, получаемый в результате его диффузии через фольгу из палладиевых сплавов [9]. Схема автоматической установки для получения водорода высокой чистоты УЧВ-2А показана на рис. 9.

Технические характеристики установки УЧВ-2А

Производительность, м ³ /ч	1,0
Содержание примесей, % к объему менее	$1 \cdot 10^{-7}$
Давление водорода при входе в установку, кгс/см ²	5—8
Давление водорода при выходе из установки, мм вод. ст.	100
Рабочая температура диффузионного элемента, $^\circ\text{C}$	400—500

Потребная мощность, кВт	8
Предельный вакуум, мм рт. ст.	$5 \cdot 10^{-2}$
Расход воды, л/ч	500
Габаритные размеры, мм	$1000 \times 700 \times 1800$
Масса, кг	370

При печной пайке высокохромистых нержавеющей сталей, жаропрочных и жаростойких сплавов необходимо применять еще более активные контролируемые атмосферы. В этих случаях используют атмосферы с добавками газообразного флюса,

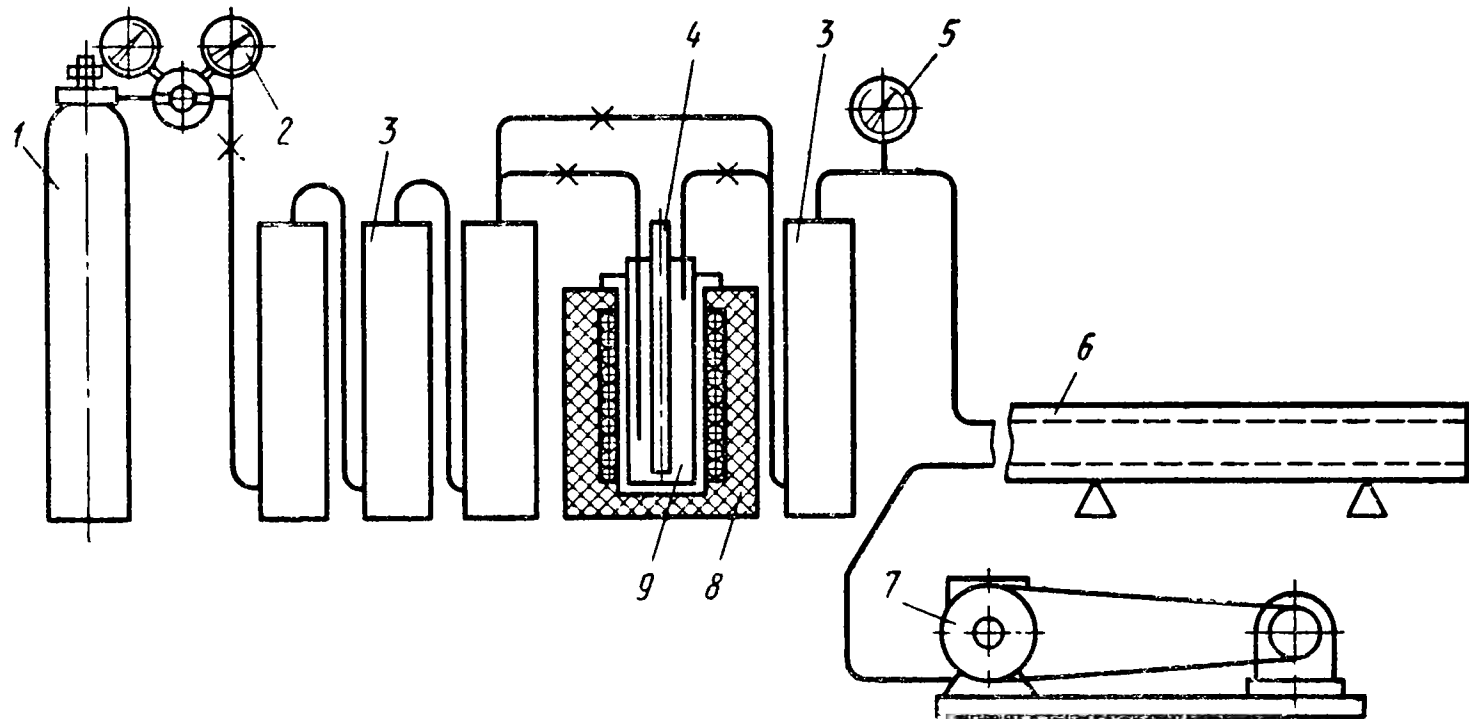


Рис. 10. Схема получения газообразного флюса:
1 — баллон с аргоном; 2 — редуктор; 3 — осушители; 4 — термопара;
5 — манометр; 6 — контейнер; 7 — форвакуумный насос; 8 — печь; 9 — диссоциатор

например, BF_3 , HF или HCl . Газообразный флюс получают смешиванием продуктов диссоциации солей с газами. Одна из возможных схем получения атмосферы проточного аргона с газообразным флюсом показана на рис. 10. Из баллона аргон через осушители поступает в диссоциатор, откуда смесь аргона с газообразным флюсом по трубопроводу направляется в вакуумированный контейнер. Избыточное давление газовой смеси в контейнере контролируется с помощью манометра.

ВАКУУМНЫЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Вакуумные электропечи конструктивно выполняются в различных вариантах: колпаковые, элеваторные, муфельные, безмуфельные, непрерывного действия и др. Широкое распространение получила колпаковая вакуумно-водородная электропечь ИО59.007 со стержневыми молибденовыми нагревателями. Электропечь снабжена вакуумным агрегатом ВА-5-4, двумя форвакуумными насосами ВН-1 и системой автоматического регулирования температуры с поддержанием разрежения в заданных пределах.

Технические характеристики вакуумных и вакуумно-водородных печей приведены в табл. 9.

В отличие от других вакуумная электропечь СКБ-7050 (табл. 10) позволяет производить пайку при температурах до 2000°C . Электропечь футерована графитом, который заключен в кожух из нержавеющей стали. Нагревателями служат 12 графитовых стержней, соединенных в нижней части общим нулевым кольцом.

В верхней крышке электропечи имеется гляделка для установки радиационного пирометра, а на боковой стенке термопарный ввод. Регулирование температуры до 1200°C производится с помощью автоматического потенциометра ПСР-1-01 и термопары ТПП-11. При температурах свыше 1200°C регулирование производится с помощью трехпозиционного устройства, встроенного в прибор ЭПП-16А и работающего в комплексе с радиационным пирометром.

9. Колпаковые вакуумные и вакуумно-водородные электропечи

Тип	Потребл. мощность, кВт	Рабочая температура, °С	Напряжение питающей сети, В	Тип нагревателя	Вакуум, мм рт. ст.*	Размеры рабочего пространства		Габаритные размеры: длина, ширина, высота, мм
						Диаметр	Высота	
Одноколпаковая вакуумная печь ИО59.010	80	2500	380/220	Вольфрамовые стержни	5·10 ⁻⁵	150	500	2500, 1000, 3500
Двухколпаковая вакуумная печь ЛМ-3206	20	1200	220/380	Молибденовые стержни	3·10 ⁻⁵	230	435	2000, 1400, 3000
Двухколпаковая вакуумная печь ЛМ-4100	25	—	220/380	Графитовые электроды	2·10 ⁻²	—	—	1850, 1350, 3220
Одноколпаковая вакуумно-водородная печь ИО59.007	100	1200	380/220	Молибденовые стержни	3·10 ⁻⁵ (1,5)	470	800	2000, 2000, 2600
Одноколпаковая вакуумно-водородная печь ИО59-008	40	1200	380/220	Молибденовые стержни	3·10 ⁻⁵ (1,5)	250	800	2000, 1000, 3500
Одноколпаковая вакуумно-водородная печь ИО59.009	40	1700	380/220	Вольфрамовые стержни	3·10 ⁻⁵ (0,8)	250	200	1500, 1000, 2600

* В скобках указан расход газа в м³ на цикл.

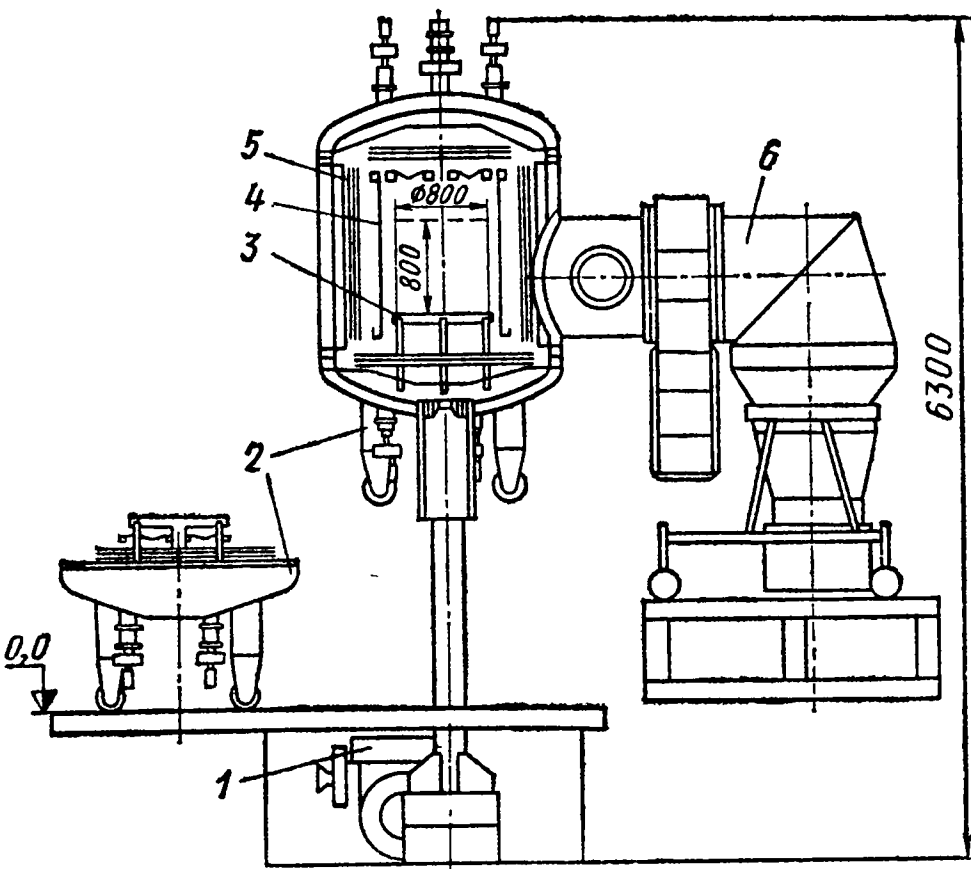


Рис. 11. Вакуумная элеваторная электропечь СЭВ-8.8/16ЭМ1:
1 — механизм подъема; 2 — нижняя крышка;
3 — подставка; 4 — нагреватель; 5 — экраны;
6 — вакуумная система

10. Вакуумные электропечи СКБ-7050 и СЭВ-8.8/16ЭМ1

Параметры	СКБ-7050	СЭВ-8.8/16ЭМ1
Мощность, кВт	140	510
Рабочая температура, °С	2000	1600
Вакуум, мм рт. ст.	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
Расход охлаждающей воды, м³/ч	3	16
Размеры рабочего пространства, мм:		
диаметр	300	800
высота	300	800
Габаритные размеры, мм:		
длина	—	9150
ширина	—	4900
высота	—	6300
Масса, т	4,6	30,2

11. Вакуумные электропечи непрерывного действия [20]

Параметры	СТВ-7.87.7/16,5-M02*1	СТВ-3,8.38/16-X30,4-M03*2	СТВ-3,8 15,8/20-X 15,2*3	ОКВ-870*4	СКВ-513*1	СЮВ-2,6.41,6/18 M02*2	ОКВ-871*3	СЛВ-16.128.16/14,5-X64-M02*4	СЛВ-16.320.16/14,5-X160-M02*4
Мощность, кВт	220	620	225	520	500	600	160	1500	2 600
Мощность нагревателей, кВт	190	520	160	400	410	500	135	1010	2 335
Число тепловых зон	6	4	1	1	3	3	3	2	2
Рабочая температура, °С	1 150	1 600	2000	2000	1 350	1 800	1400	1450	1 450
Вакуум, мм рт. ст.	10-1	5.10-2	10-3	10-3	0,1	5.10-4	20-30*3	5.10-2	5.10-2
Размеры рабочего пространства, мм:									
ширина	700	—	—	920	390	—	300	1 100	1 100
высота	700	160	300	270	325	70	200	400	400
длина	8 400	3 800	1520	1300	4 050	4 160	2 400	6 400	16 000
Габаритные размеры, мм:									
ширина	4 920	5 200	3800	8750	5 860	6 200	5 320	11 500	8 100
длина	17 800	11 470	9900	9550	18 590	12 600	12 600	4 400	96 000
высота	6 180	7 800	320	2950	5 230	8 440	3 510	7 200	8 750
Масса, т	48	42	13,5	34,4	37,2	61	23,7	200	485

*1 Толкательные печи.
*2 Печи с шагающим подом.
*3 Печь рассчитана также на работу с водородной атмосферой.
*4 Тоннельные печи.

Вакуумный блок состоит из бустерного паромасляного вакуумного насоса БН-2000 и механического насоса ВН-4Г. Электропечь оснащена аппаратурой для измерения вакуума и блокировочным вакуумметром ВМБ-2 в случае падения вакуума в рабочей камере. Питание электропечи осуществляется через два печных трансформатора ТСУ-120/05 и автотрансформатор АТМК-250/05А [32].

Для пайки изделий в крупносерийном и массовом производстве при температурах до 1000° С можно рекомендовать высокопроизводительную вакуумную элеваторную электропечь сопротивления СЭВ-8.8/16ЭМ1 (рис. 11, табл. 10). Она предназначена для пайки припоями, имеющими в расплавленном состоянии упругость паров не более 10⁻⁵ мм рт. ст. (для изделий из металлов, металлокерамики, полупроводниковых материалов и т. д.).

Откачная система электропечи состоит из механического насоса ВН-4Г, высоковакуумного агрегата ВА-20-1М и механического насоса ВН-1МГ. Регулирование температуры автоматическое. Предусмотрена блокировка, обеспечивающая безопасную работу электропечи [4].

Основные технические характеристики вакуумных электропечей непрерывного действия приведены в табл. 11.

В производстве электровакуумных приборов применяют конвейерные вакуумно-водородные электропечи с шлюзованием паяемых изделий. Например, печь типа И.059.012 обеспечивает производительность 20 паяных изделий в час. Режимы пайки в электропечи программируют и фиксируют с помощью самопишущих приборов [14].

Технические характеристики электропечи И.059.012

Мощность, кВт	70	Габаритные размеры, мм:	
Рабочая температура, °С	1200	длина	11500
Вакуум, мм рт. ст.	5 · 10 ⁻⁵	ширина	1200
Размеры рабочего пространства, мм:		высота	1600
диаметр	150		
длина	150		

Для пайки изделий, изготовленных из титана, циркония, бериллия, применяют вакуумные электропечи без керамической футеровки, например, высокотемпературную вакуумную электропечь с экранной теплоизоляцией типа СШВ-15.15/13Э-М2 [30].

Печь состоит из трех тепловых зон, нагреватели питаются от сети через понижающие трансформаторы. Предварительная откачка производится насосами ВН-4Г. Высоковакуумная откачка камеры производится тремя агрегатами РВА-6-1. Теплоизоляция состоит из пяти молибденовых экранов и двух из нержавеющей сталей.

Для пайки изделий из активных материалов при более низких температурах (до 900° С) используют вакуумные шахтные электропечи типа СШВ-8.8/9Э-М1 и СШВ-11.38,5/9Э-М1 (табл. 12).

12. Вакуумные шахтные электропечи с экранной теплоизоляцией

Параметры	СШВ-15 15/3ЭМ2	СШВ-8.8/9Э-М1	СШВ-11.38,5/9Э-М1
Мощность, кВт:			
установленная	550	154	565
камеры нагрева	485	130	500
Рабочая температура, °С	1300	900	900
Вакуум, мм рт. ст.	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
Число тепловых зон	3	1	5
Время разогрева, ч	10	1	1
Максимальная масса паяемых изделий, кг	2000	400	4000
Расход воды, м ³ /ч	22	6,5	19
Размеры рабочего пространства, мм:			
диаметр	500	800	1100
высота	1500	800	4000
Габаритные размеры, мм:			
длина	7300	4520	9250
ширина	6740	3300	5425
высота	4700	2550	5970
Масса печи, т	39,2	6,0	19,5

Паяемые изделия в электропечи СШВ-8.8/9Э-М1 устанавливают на подовую жаростойкую плиту, а в электропечи СШВ-11.38,5/9Э-М1 подвешивают на жаростойкую раму, расположенную в верхней части электропечи. На кожухе электропечей предусмотрены патрубки для установки выводов нагревателей, термопар, смотровых устройств и подсоединения вакуумной системы.

Существуют различные варианты печной пайки в вакууме (рис. 12).

Электропечь может быть заключена в герметичный охлаждаемый кожух, к которому подсоединена откачная система (рис. 12, а). Рабочая температура печи ограничена огнеупорностью футеровки и стойкостью нагревателей. При работе кожух остается холодным и условия его герметизации не нарушаются. Футеровку выполняют из керамических огнеупорных материалов или металлических экранов. Электропечи, футерованные огнеупорным материалом, обладают большой тепловой инерцией, т. е. требуют значительного количества энергии и времени на разогрев и

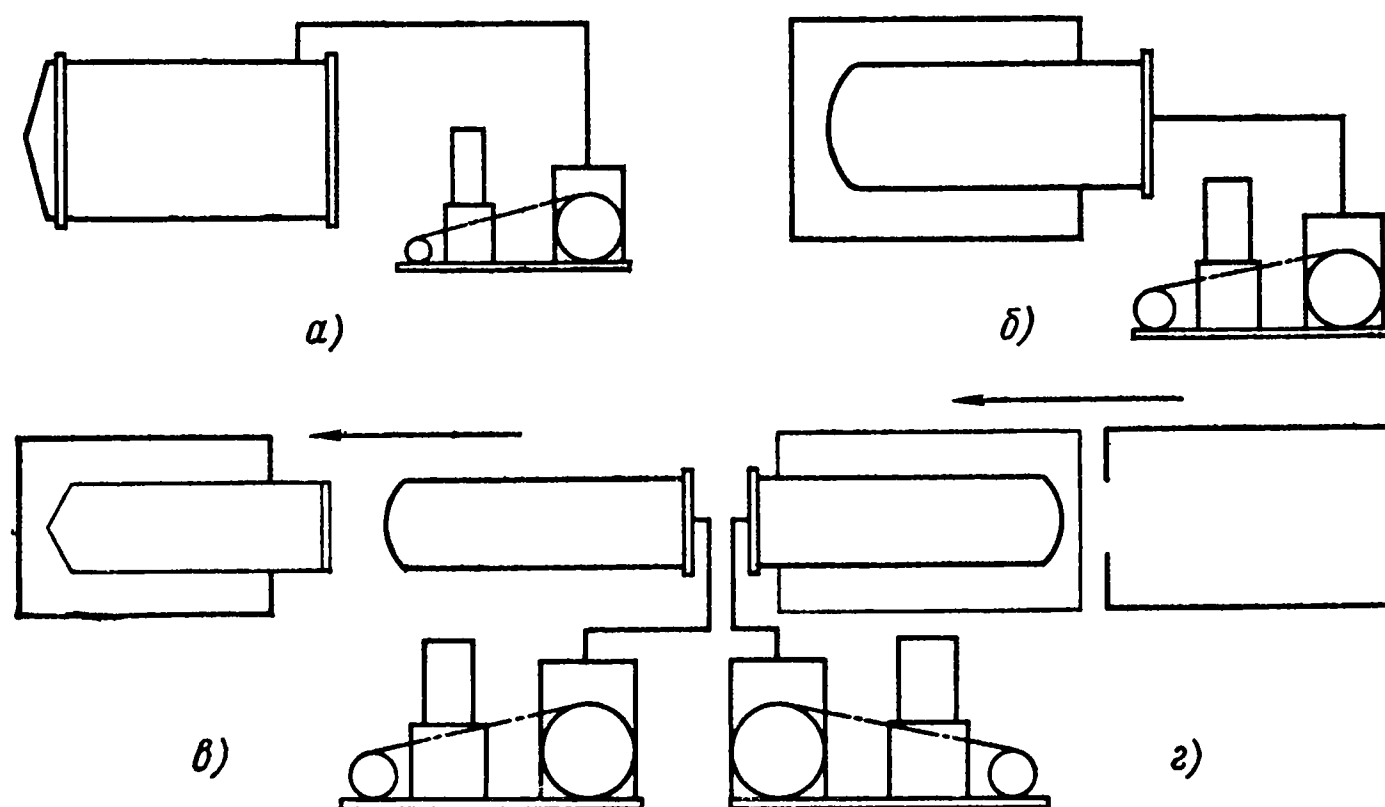


Рис. 12. Схемы типовых конструкций камерных вакуумных электропечей:
 а — безмуфельная; б — муфельная; в — контейнерная с неподвижной нагревательной камерой и перемещающимся контейнером; г — контейнерная с перемещающейся нагревательной камерой и неподвижными контейнерами

медленно охлаждаются. Электропечи с экранной теплоизоляцией могут быть быстро разогреты, аккумулируют мало тепла и быстро охлаждаются, но тепловые потери обычно больше, чем у электропечей, футерованных огнеупорными материалами [37].

В муфельных печах жароупорный муфель имеет цилиндрическую форму, и к нему подсоединяют откачную систему (рис. 12, б).

При контейнерной пайке электропечь комплектуют несколькими контейнерами, легко устанавливаемыми и извлекаемыми из камеры нагрева. Существуют два конструктивных исполнения печей: 1) с неподвижной камерой нагрева и перемещающимися контейнерами (рис. 12, в) и 2) неподвижными контейнерами и перемещающейся камерой нагрева (рис. 12, г). Контейнерные электропечи для вакуумной пайки имеют повышенную производительность, поскольку позволяют охлаждать контейнер вне камеры нагрева. В таких электропечах камера нагрева постоянно разогрета; остывают только контейнеры, что к тому же еще и снижает расход энергии на разогрев камеры.

Контейнерные вакуумные электропечи работают при температурах, которые ограничиваются стойкостью металлического контейнера, изготовляемого из нержавеющей сталей или жаростойких сплавов. Конструктивно такие жесткие контейнеры не отличаются от контейнеров для пайки изделий в контролируемой атмосфере за исключением необходимости обеспечить вакуумную плотность сварных швов и уплотнения (в случае наличия съемного фланца).

В случае пайки сложных по конфигурации узлов и изделий (охлаждаемые рабочие лопатки турбины, слоистые конструкции и др.), когда необходимо осуществить равномерное поджатие сопрягаемых поверхностей, используют мягкие вакуумируемые контейнеры из тонколистовых материалов.

Нагреватели вакуумных электропечей. Наряду с обычными материалами, применяемыми для нагревательных элементов (нихромы, хромели), в вакуумных электропечах для нагревателей применяют тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден, тантал), легко окисляющиеся на воздухе, но в вакууме работающие вполне удовлетворительно. Широкое применение для нагревателей вакуумных электропечей нашел графит. Значения скорости испарения и давления пара тугоплавких металлов при высоких температурах приведены в табл. 13, а некоторые характеристики материалов нагревательных элементов высокотемпературных вакуумных электропечей — в табл. 14.

13. Зависимость скорости испарения и давления пара вольфрама, молибдена и тантала от температуры

Температура, °C	Вольфрам		Молибден		Тантал	
	<i>w</i>	<i>p</i>	<i>w</i>	<i>p</i>	<i>w</i>	<i>p</i>
1427	—	—	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-10}$	—	—
1527	—	—	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-9}$	—	—
1727	—	—	$5,3 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$1,235 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-11}$
1927	$2,18 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-9}$
2127	$1,33 \cdot 10^{-10}$	$8,22 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,83 \cdot 10^{-9}$	$1,76 \cdot 10^{-7}$
2327	$4,28 \cdot 10^{-9}$	$2,75 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$5,56 \cdot 10^{-8}$	$3,36 \cdot 10^{-6}$
2527	$8,28 \cdot 10^{-3}$	$5,51 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$7,14 \cdot 10^{-7}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$
2727	$1,06 \cdot 10^{-6}$	$7,35 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$4,53 \cdot 10^{-4}$
2927	$9,85 \cdot 10^{-6}$	$7,02 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—

О б о з н а ч е н и я: *w* — скорость испарения, г/см² · с; *p* — давление пара, мм рт. ст.

14. Материалы нагревательных элементов высокотемпературных вакуумных электропечей [37]

Наименование величины	Молибден	Тантал	Вольфрам	Графит
Температура плавления, °C	2600	3000	3380	3700
Максимальная температура применения в вакууме, °C	1700	2200	2300	2200
Удельное электросопротивление, Ом·мм ² /м	0,048	0,155	0,055	8—12
Температура начала контактных реакций, °C *:				
с углеродом	1500	1000	1500	—
с окисью бериллия	1900	1600	2000	2300
с окисью магния	1600	1800	2000	1800
с двуокисью циркония	2200	1600	1600	1600
с двуокисью тория	1900	1900	2200	2000
Плотность, кг/дм ³	10,2	16,6	19,34	2,2

* Температура относится к химически чистым материалам. Для технических материалов приведенные значения должны быть несколько снижены,

Средства откачки. Для создания вакуума в печи или контейнере применяют вакуумные насосы. Для получения остаточных давлений в рабочем объеме 10⁻²—10⁻³ мм рт. ст. используют механические ротационные насосы (табл. 15). В установках для создания высокого вакуума порядка 10⁻⁴—10⁻⁵ мм рт. ст. применяют диффузионные насосы. Механические насосы в этом случае служат для создания предварительного вакуума и для откачивания газов, выталкиваемых диффузионными насосами. Типовая схема устройства для получения высокого вакуума приведена

на рис. 13, в нее входят ротационный (форвакуумный) насос 1; сильфонный компенсатор 2, предотвращающий распространение вибраций от привода насоса; фильтр 3 для очистки откачиваемой атмосферы от механических примесей; вакуумный вентиль 4, отсекающий вакуумную систему от рабочего пространства; диффузионный

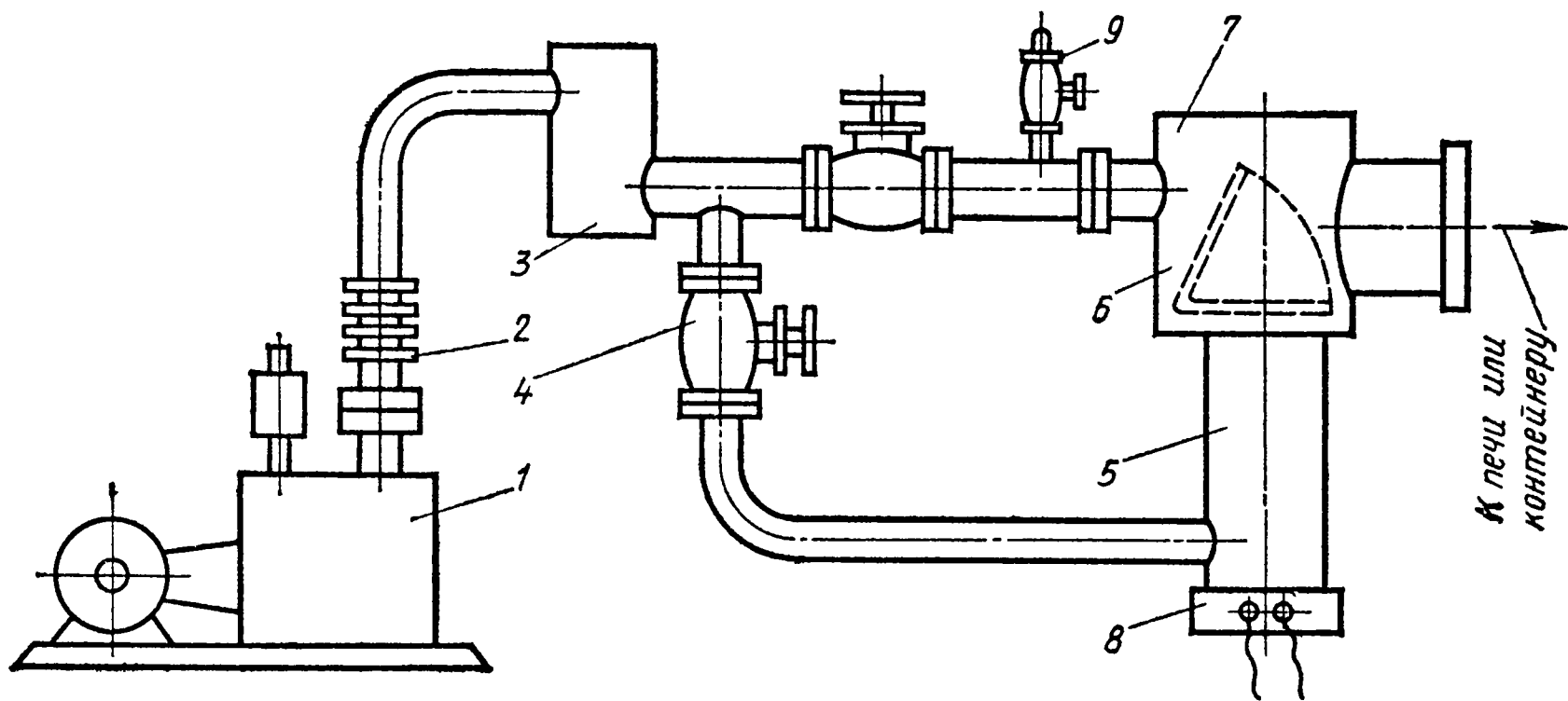


Рис. 13. Типовая схема установки для получения высокого вакуума

насос 5. Вакуумный затвор диффузионного насоса 7 с заслонкой 6 служит для отсоединения диффузионного насоса от системы. Нагрев диффузионного насоса производится нагревателем 8. Вентиль 9 предназначен для впуска в печь или контейнер воздуха или контролируемой атмосферы.

Промышленность выпускает вакуумные агрегаты, представляющие собой диффузионный насос, в комплекте с вакуумным затвором (табл. 16).

15. Механические вакуумные насосы

Марка	Средняя скорость откачки при давлении 760 мм рт. ст.	Предельный вакуум, мм рт. ст.	Мощность двигателя, кВт	Масса, кг
ВН-461М	0,81	$1 \cdot 10^{-3}$	0,6	75
РВН-20	3,3	$5 \cdot 10^{-3}$	0,6	75
ВН-2Г	7,0	$3 \cdot 10^{-3}$	1,7	108
ВН-1МГ	18,3	$3 \cdot 10^{-3}$	2,8	312
ВН-4Г	59,0	$5 \cdot 10^{-3}$	7,0	590
ВН-6Г	155,0	$1 \cdot 10^{-2}$	18,0	1521

16. Вакуумные агрегаты

Тип	Средняя скорость откачки при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., дм ³ /с	Масса, кг	Расход охлаждающей воды, дм ³ /с	Рекомендуемый насос предварительной откачки
ВА-01-1	50	43	0,014	ВН-461М, РВН-20
ВА-05-1	250	85	0,033	ВН-2Г
ВА-5-4	2200	330	0,11	ВН-1МГ
ВА-8-4	4000	476	0,14	ВН-1МГ

Вакуумные затворы (табл. 17) используют для устройства шлюзования отдельных узлов вакуумных электропечей, камер охлаждения и, кроме того, в автоматических линиях, входящих в состав различных вакуумных установок для пайки.

К нормализованным относят узлы вакуумных уплотнений, гидроцилиндры механизма прижима заслонок, фланцы и присоединительные места, кронштейны крепления электропривода и вакуумный уплотнительный шнур [28].

17. Вакуумные затворы

Параметры	Размеры условного прохода, мм			
	Φ 160	Φ 380	Φ 500	700 × 700
Габаритные размеры, мм:				
высота	1000	1250	1800	2500
ширина	400	650	800	1100
толщина (по фланцам)	140	180	200	280
Рабочий вакуум, мм рт. ст.	5 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴
Мощность привода, кВт	0,125	0,6	0,6	1
Напряжение сети, В	220/380	220/380	220/380	220/380
Время открывания, с	15	25	30	30
Количество гидроцилиндров	—	—	—	4
Максимальное натекание, л·мкм	0,1	0,24	0,32	0,5
Масса, кг	220	600	1100	1800

Параметры	Размеры условного прохода, мм			
	1600 × 1600	2200 × 2200	900 × 1800	1200 × 2400
Габаритные размеры, мм:				
высота	5400	7000	6000	7600
ширина	2400	3200	1400	1800
толщина (по фланцам)	340	360	320	340
Рабочий вакуум, мм рт. ст.	5 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴
Мощность привода, кВт	4,5	7	2,8	4,5
Напряжение сети, В	220/380	220/380	220/380	220/380
Время открывания, с	60	75	60	75
Количество гидроцилиндров	8	8	6	8
Максимальное натекание, л·мкм	1,2	1,6	1	1,3
Масса, кг	7000	12 000	5000	8500

Предельный вакуум, создаваемый высоковакуумными агрегатами указанного типа, составляет 5·10⁻⁶ мм рт. ст.

Для соединения или перекрытия отдельных частей вакуумных систем служат вентили. На рис. 14 показаны конструкции вентиляй, у которых шток уплотнен сильфоном 5. Перекрытие вентиля производится прижатием металлического клапана 1 с резиновой прокладкой 2 (рис. 14, б) к седлу стального корпуса 3. Перемещение клапана происходит при повороте гайки 4 или винта 6. Шток 7 удерживается от поворота шпонкой.

Высоковакуумный вентиль с электромагнитным уплотнением (иногда такие вентили называют клапанами) показан на рис. 15, а. Открывание вентиля происходит при помощи пружины 1, упирающейся в сердечник 2. Уплотняющим элементом служит резиновая прокладка 3 клапана 4. Электромагнит позволяет автоматизировать управление вентилем. На рис. 15, б показан высоковакуумный вентиль. Клапан 5 вентиля через рычажную систему связан с сердечником 6 электромагнита постоянного тока, катушка 7 которого приводится в возвратно-поступательное движение при помощи винта 8 и гайки 9. Вакуумное уплотнение обеспечивается сплавом галлия, заполняющим кольцевую выточку корпуса вентиля, куда входят края клапана. Сплав плавится нагревателем 10; в выточке корпуса циркулирует вода, охлаждающая сплав в то время, когда затвор закрыт или открыт. Температура плавления сплава 80—100° С. Диаметр проходного отверстия вентиля 80 мм. В практике используют и другие конструкции вакуумных вентиляй [27].

Приборы для измерения вакуума. Количественная оценка вакуума производится с помощью специальных приборов. Приборы для измерения малых абсолютных давлений называют манометрами, а рабочие приборы для измерения остаточных давлений — вакуумметрами.

Допустимые погрешности при измерении вакуума следующие [10]:

Давление, мм рт. ст.	750—10 ⁻²	10 ⁻² —10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ —10 ⁻⁸	10 ⁻⁸ —10 ⁻¹⁰
Относительная погрешность, %	0,1—0,5	1—5	5—10	10—50

Рис. 14. Сильфонные вакуумные вентили:
а — с металлическим клапаном; б — с резиновой прокладкой клапана

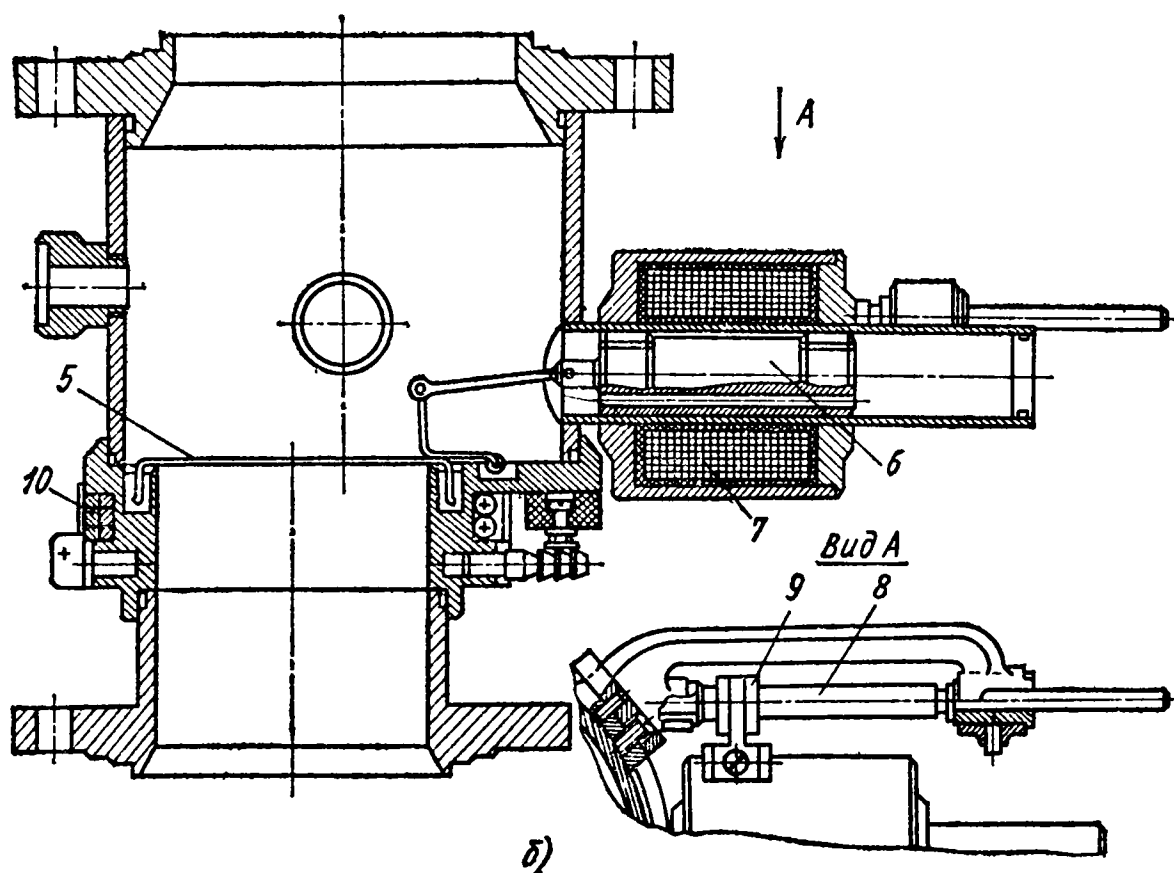
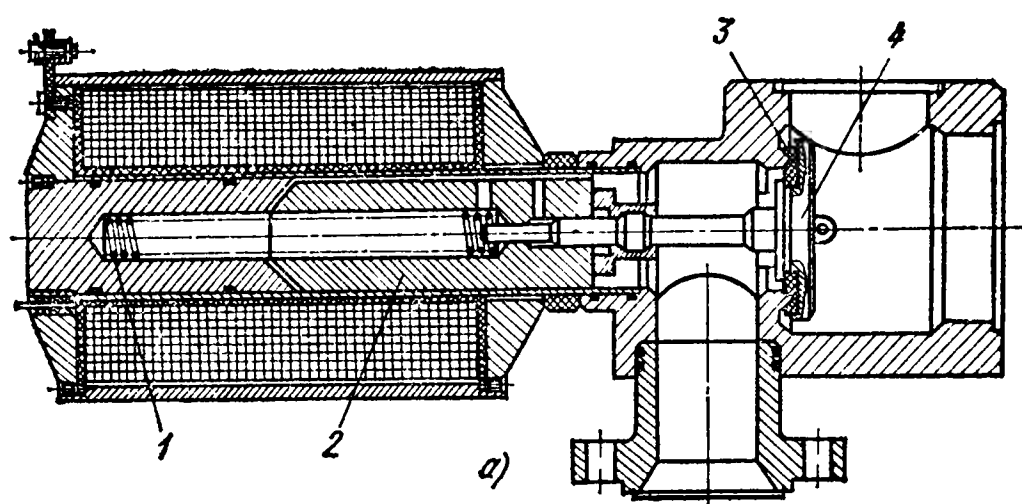
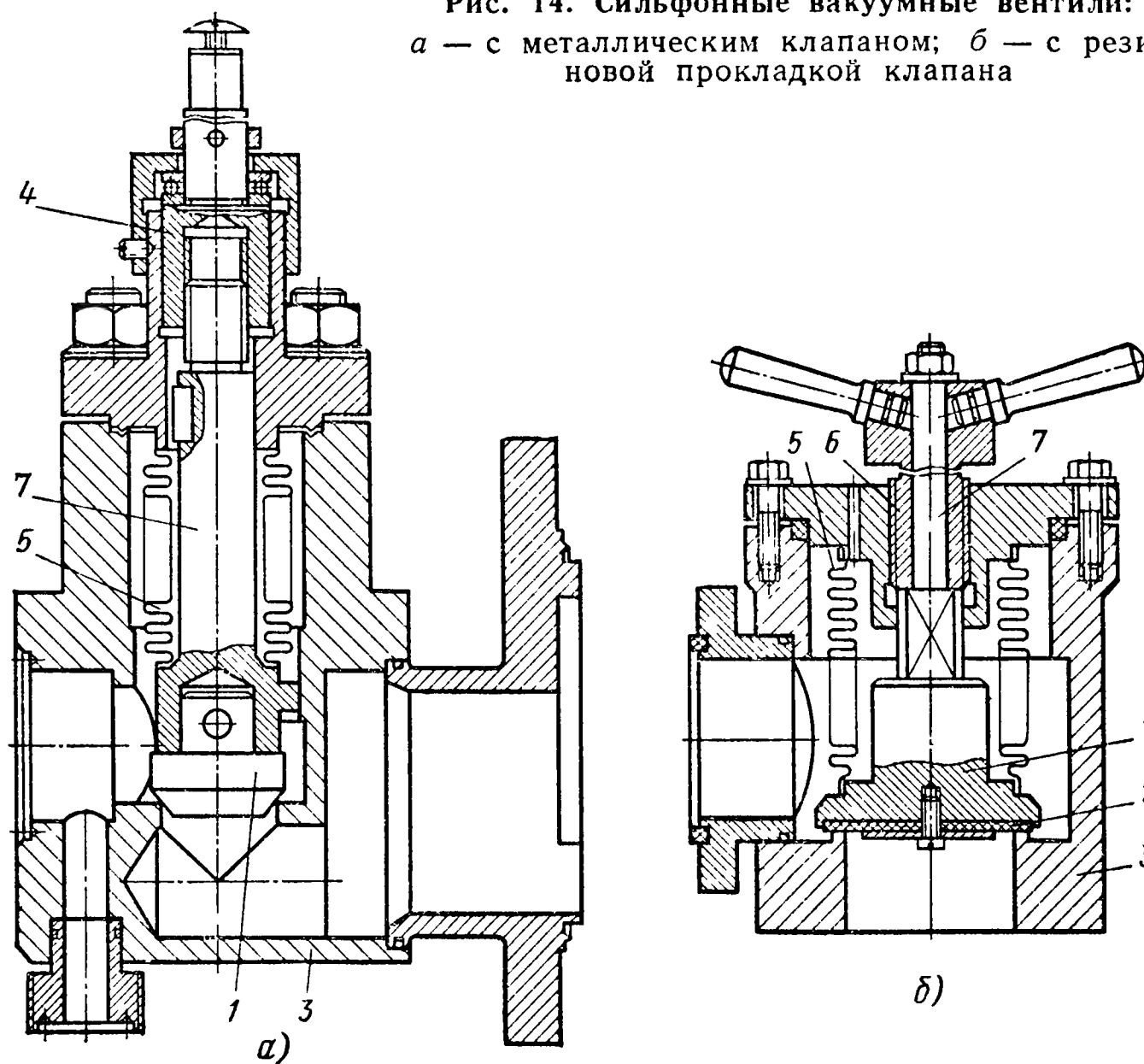


Рис. 15. Высоковакуумные вентили с электромагнитным управлением:
а — с резиновой прокладкой клапана; б — с уплотнением клапана сплавом

Вакуумметры термопарные типа ВТ-2А и ВТ-2А-П представляют собой измерительные установки, состоящие из термопарного манометра, схемы для питания нагреваемой термопары и прибора, измеряющего т. э. д. с. Вакуумметр термопарный выполняется в двух вариантах: ВТ-2А — переносной прибор настольного типа, ВТ-2А-П — панельный, отличаются только размерами.

Весь диапазон измеряемых давлений подразделяют на два поддиапазона: $1-2 \cdot 10^{-1}$; $2 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$ мм рт. ст. В поддиапазоне измеряются давления $2 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$ мм рт. ст.; вакуумметр рассчитан на работу с термопарой ЛТ-2 или ЛТ-4М, но без прямого отсчета давления по шкале прибора. В поддиапазоне $1-2 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. применяют термопарную манометрическую лампу ЛТ-2 (рис. 16).

Принципиальная электрическая схема измерительного блока термопарного вакуумметра типа ВТ-2 показана на рис. 17. Блок состоит из феррорезонансного стабилизатора напряжения, выпрямителя и измерительного прибора.

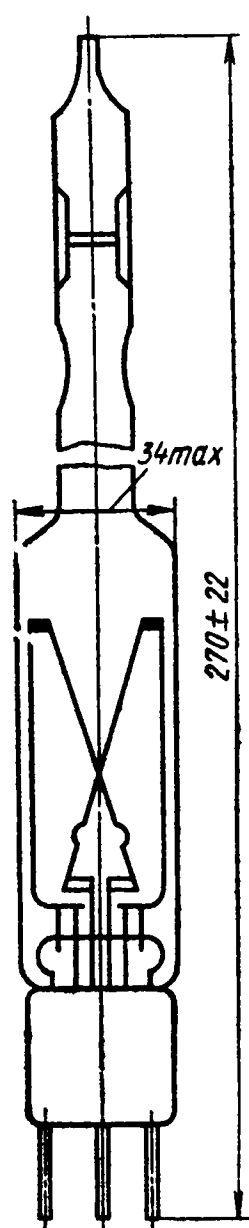


Рис. 16. Термопарная манометрическая лампа ЛТ-2

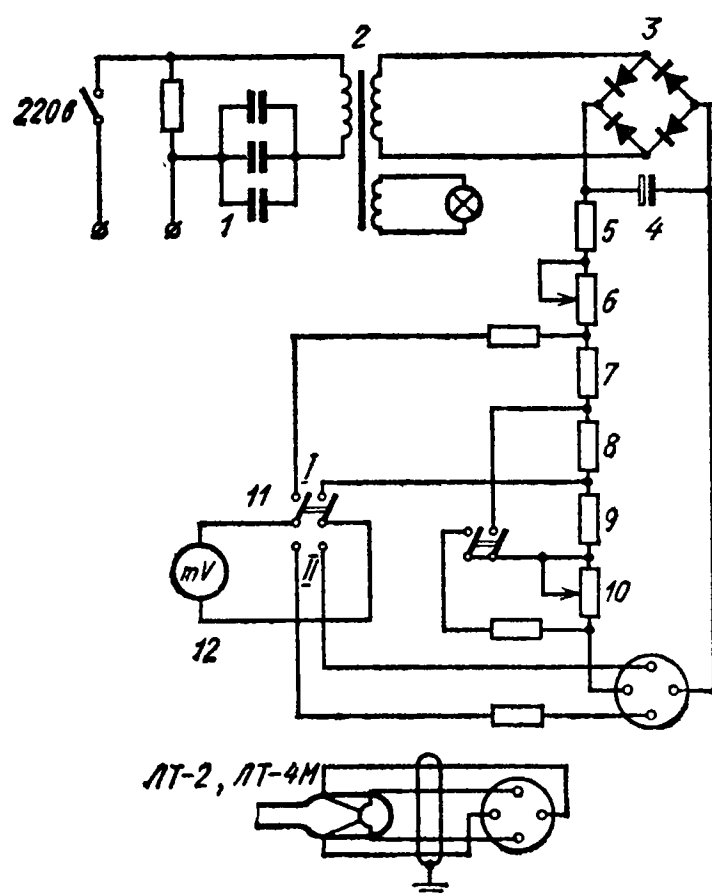


Рис. 17. Принципиальная электрическая схема измерительного блока термопарного вакуумметра ВТ-2

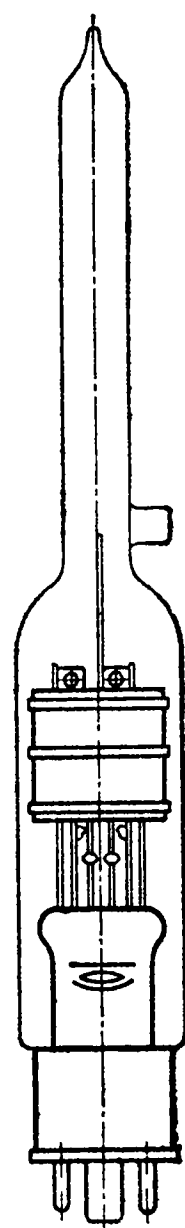


Рис. 18. Ионизационная манометрическая лампа ЛМ-2

Феррорезонансный стабилизатор содержит специальный двухкernовый трансформатор 2, собранный на Г-образном сердечнике, и группу параллельно соединенных конденсаторов 1, включенную последовательно с первичной обмоткой трансформатора. Выпрямитель 3 представляет собой однофазную мостовую схему, в диагональ которой параллельно нагрузке включен конденсатор фильтра 4. Нагрузкой выпрямителя служит подогреватель термопары, последовательно с которым включены балластные сопротивления 5, 6, 9 и 10 (их сумма в 80—100 раз больше сопротивления подогревателя). Следовательно, изменение сопротивления подогревателя при изменении его температуры практически не влияет на полное сопротивление нагрузки выпрямителя, что и обеспечивает стабилизацию тока подогревателя при изменении давлений в пределах измерения. Ток подогревателя и т. э. д. с. термопары измеряют одним и тем же прибором 12, который при помощи переключателя 11 подключают к холодным концам термопары (положение 11 — «Измерение») или к шунтам 7, 8 в цепи накала подогревателя (положение 1 — «Ток накала»). Ток накала регулируют реостатом 10 (с гравировкой «Регулировка тока накала»).

Габаритные размеры термопарных вакуумметров ВТ-2А $266 \times 248 \times 257$ мм; ВТ-2А-П $430 \times 220 \times 146$ мм.

Вакуумметр ионизационный типа ВИ-12 предназначен для измерения давления в диапазоне 10^{-4} — 10^{-10} мм рт. ст. и представляет собой измерительную установку, рассчитанную на работу с ионизационным манометрическим преобразователем ИМ-12.

Для измерения давления газа при большой степени разрежения с помощью ионизационного манометрического преобразователя ИМ-12 используют явление изменения ионного тока при изменении давления, когда ток эмиссии остается постоянным. Измеряя ионный ток преобразователя, можно определить давление газа в вакуумной системе. При большой степени разрежения (до 10^{-10} мм рт. ст.), ионный ток преобразователя очень мал ($2 \cdot 10^{-7}$ — $2 \cdot 10^{-13}$ А) и непосредственно измерен быть не может. Поэтому в вакуумметре ВИ-12 использован косвенный метод измерения тока. Ионный ток, пропускаемый через известное высокоомное сопротивление, создает в нем некоторое падение напряжения. Это напряжение подается на вход усилителя постоянного тока со 100%-ной отрицательной обратной связью и измеряется на выходе усилителя в компенсационной схеме стрелочным прибором, градуированным по входному току. Измеряемое давление определяется по градуировочной кривой, отражающей зависимость давления от ионного тока.

Наиболее распространенным манометрическим преобразователем, применяемым в отечественных ионизационных вакуумметрах, является ионизационная манометрическая лампа типа ЛМ-2 (рис. 18). Вдоль оси стеклянного баллона расположен V-образный катод из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм, вокруг катода — анод в виде редкой двухзаходной сетки из молибденовой проволоки диаметром 8 мм. Анод можно прогревать непосредственно пропусканием электрического тока. Он окружен ионным коллектором, который изготовлен из тонкой никелевой фольги и имеет форму цилиндра диаметром 27 мм. Для снижения токов утечки ввод ионного коллектора выполнен отдельно от остальных электродов лампы. Пределы измерения ЛМ-2 ограничены давлениями порядка 10^{-7} мм рт. ст.

Манометрическую лампу типа ЛМ-2 обычно применяют в комплекте вакуумметра типа ВИ-3 или в ионизационной части вакуумметра типа ВИТ-1. Принципиальная электрическая схема измерительного блока вакуумметра типа ВИ-3 показана на рис. 19. Аналогичное устройство имеет и электрическая схема ионизационной части вакуумметра типа ВИТ-1*. Блок состоит из феррорезонансного стабилизатора, выпрямителя, электронно-магнитного стабилизатора тока эмиссии манометрической лампы и усилителя тока ионного коллектора.

Выпрямитель собран по двухполупериодной схеме на лампе 3 типа 6Ц5С. В качестве фильтра включена емкость. От выпрямителя питаются анодная цепь манометрической лампы, делитель напряжения, с которого снимается опорное напряжение на сетку лампы 5 типа 6П3С, и анодная цепь усилителя тока ионного коллектора. Стабилизатор тока эмиссии выполнен на лампе 5 типа 6П3С, работающей как регулируемый однополупериодный выпрямитель. Напряжение на анод лампы подается с вторичной обмотки трансформатора 4, первичная обмотка которого включена последовательно с нитью накала манометрической лампы и обмоткой трансформатора накала 1, питающего эту цепь. Внутреннее сопротивление лампы 5 зависит от напряжения на ее управляющей сетке, определяемого током в цепи катода манометрической лампы. Таким образом, при изменении тока эмиссии изменяется потенциал на управляющей сетке лампы 5 и сила тока, протекающего через эту лампу, т. е. изменяется нагрузка на вторичной обмотке трансформатора 4, а следовательно, и полное сопротивление первичной обмотки трансформатора. Это компенсирует изменение тока эмиссии манометрической лампы путем коррекции напряжения ее накала в ту или иную сторону. Сопротивлением 2 подбирают режим лампы 5. Ручка потенциометра 6 выведена на переднюю панель измерительного блока с гравировкой «Регулировка эмиссии». Ток эмиссии манометрической лампы ЛМ-2 устанавливают равным 5 мА, что соответствует риску А в середине шкалы измерительного прибора 9 вакуумметра. Этот же прибор с помощью переключателя 10 может быть включен в цепь измерения тока ионного коллектора. Усилитель тока ионного коллектора выполнен на лампе 11 типа 6Н7С по мостовой схеме. Измеряемый ток проходит по одному из сопротивлений 12 в зависимости от положения переключателя «Множитель шкалы» и создает в нем падение напряжения 0—0,27 В. Регистрирующий при-

* Государственный реестр мер и измерительных приборов СССР, № 1581—61.

бор 9 включен в диагональ моста между анодами лампы 11. Балансировку моста производят потенциометром 7 «Регулировка нуля», при этом управляющая сетка рабочего триода должна быть отключена от коллектора переключателем 13 «Установка нуля» — «Измерение», поставленным в положение «Установка нуля». Дополнительная балансировка схемы при смене лампы 11 может быть осуществлена с помощью потенциометра 8 «Коррекция нуля», выведенного на заднюю стенку шасси.

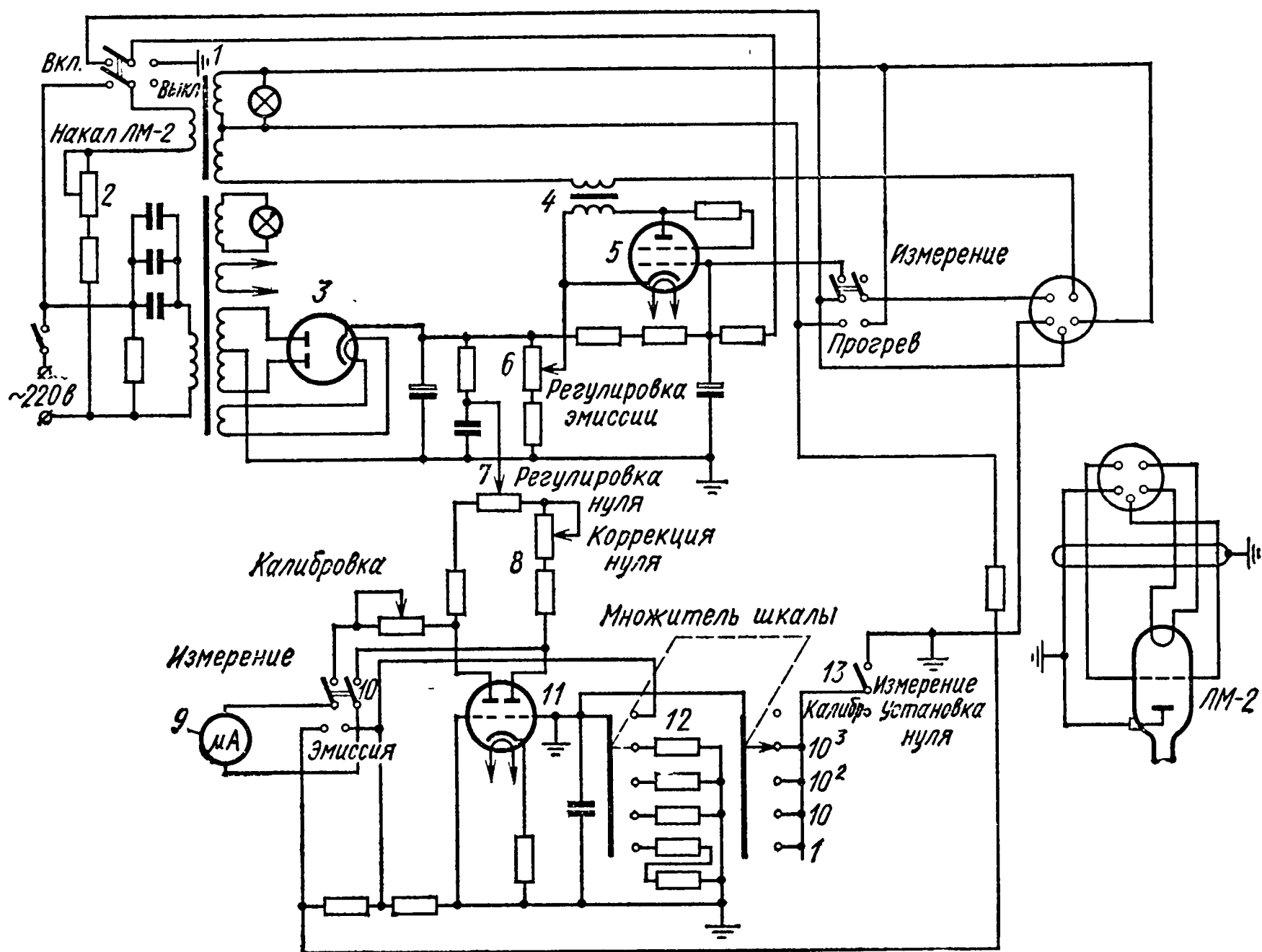


Рис. 19. Электрическая схема измерительного блока вакуумметра ВИ-3

Для измерения более низких давлений в практических условиях пайки применяют манометрическую лампу ИМ-12, которая отличается от лампы ЛМ-2 большими размерами баллона, отсутствием карболитового цоколя и несколько иной конструкцией электродов. В вакуумметр ВИ-12 входит также и выносной блок. На передней панели размещены все ручки управления и два стрелочных прибора для измерения тока коллектора и тока эмиссии ИМ-12. Прибор позволяет производить запись давления, для чего на задней стенке имеется разъем «Запись» для подключения самопишущего прибора.

Прибор рассчитан для работы при температуре окружающего воздуха 10—35° С. Питание вакуумметра осуществляется от сети 220 В, 50 Гц. Потребляемая мощность не более 280 ВА.

Габаритные размеры прибора 420 × 300 × 232 мм.

ИНДУКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Преимущество индукционных муфельных электропечей — быстрый разогрев муфеля до температуры пайки.

Общий вид индукционной муфельной камерной электропечи промышленной частоты показан на рис. 20.

При необходимости производить вертикальную загрузку изделий больших габаритов применяют индукционные установки промышленной частоты с верти-

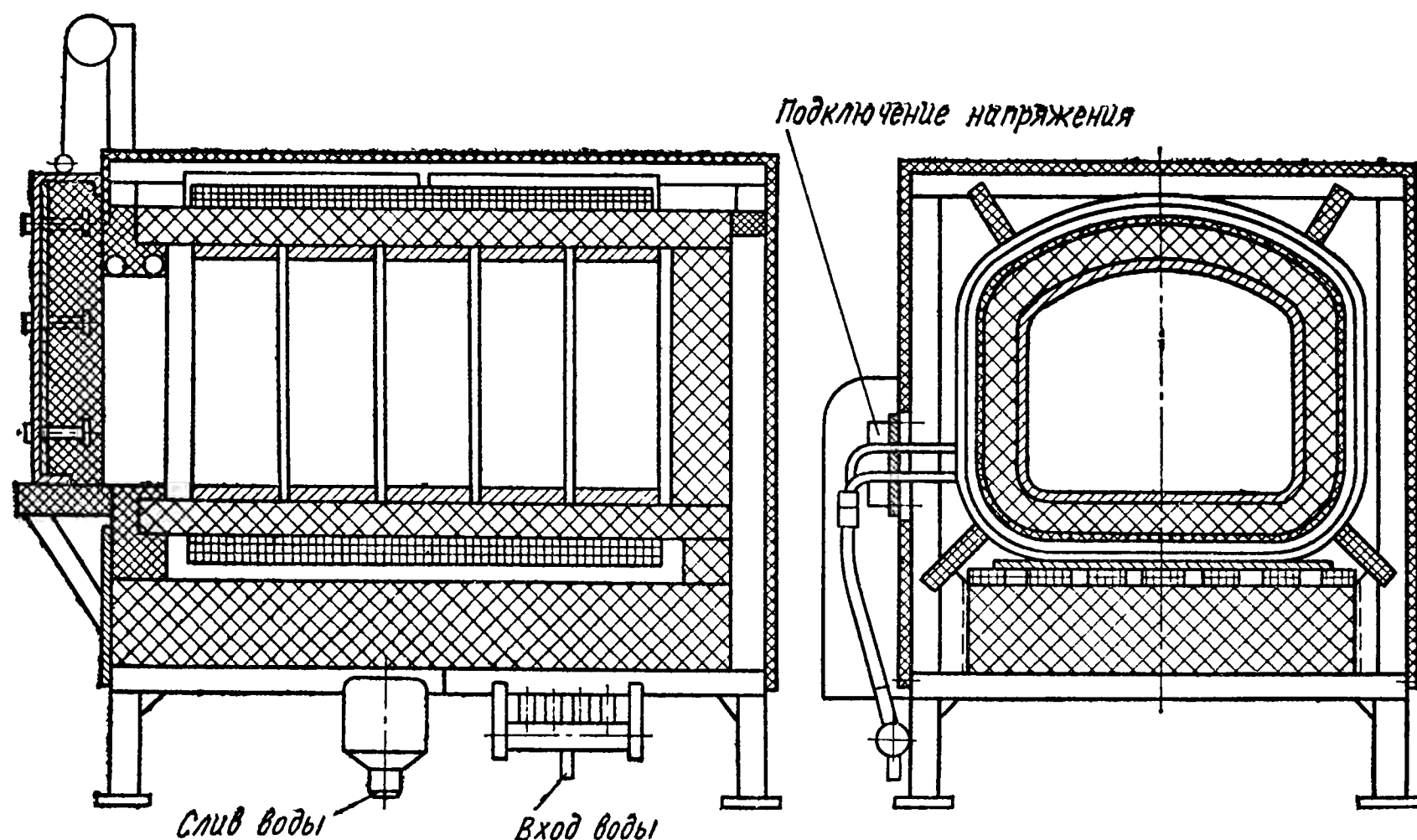


Рис. 20. Общий вид индукционной муфельной электропечи промышленной частоты

кальным расположением муфеля (рис. 21). Такие установки представляют собой индукционные электропечи с загрузкой изделий снизу и с выдвижной тележкой для пода, который поднимается гидравлическим подъемником.

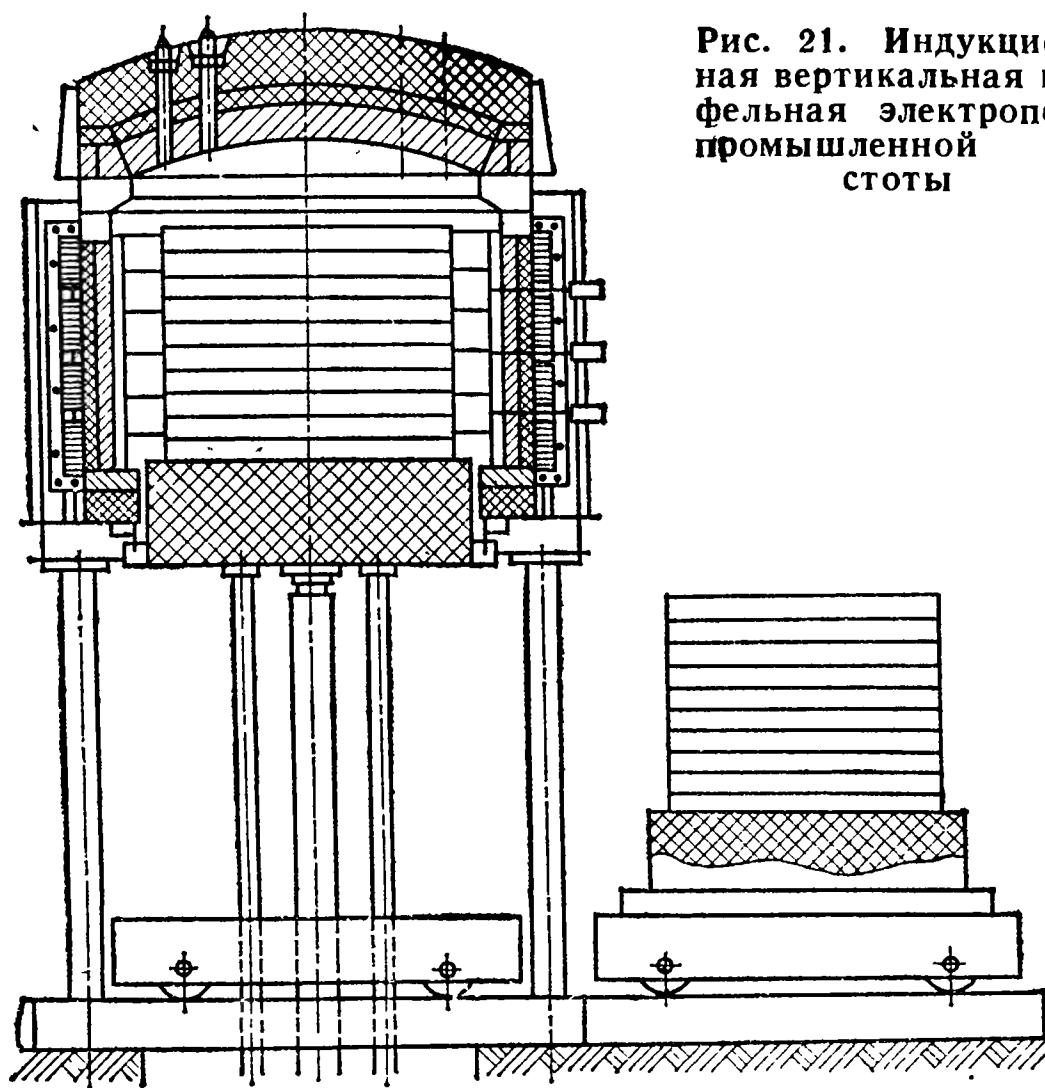


Рис. 21. Индукционная вертикальная муфельная электропечь промышленной частоты

Применение индукционных муфельных электропечей промышленной частоты позволяет производить пайку изделий в вакууме, в контролируемой атмосфере и на воздухе с использованием флюсов.

ПАЙКА ИНДУКЦИОННАЯ

Преимуществом индукционной пайки является быстрый нагрев паяемых изделий, обеспечивающий высокую производительность труда благодаря возможности механизации и автоматизации процесса.

УСТАНОВКИ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ

При индукционном нагреве в качестве источников питания применяют машинные и ламповые генераторы. Различают повышенные частоты (500—10 000 Гц) и высокие (выше 500 000 Гц).

Ламповые генераторы преобразуют электрический ток частотой 50 Гц в ток высокой частоты. Для пайки чаще всего применяют токи частотой 150—600 кГц. Принципиальная схема работы лампового генератора показана на рис. 22. Первичная обмотка 1 трансформатора питается переменным током напряжением 220/380 В.

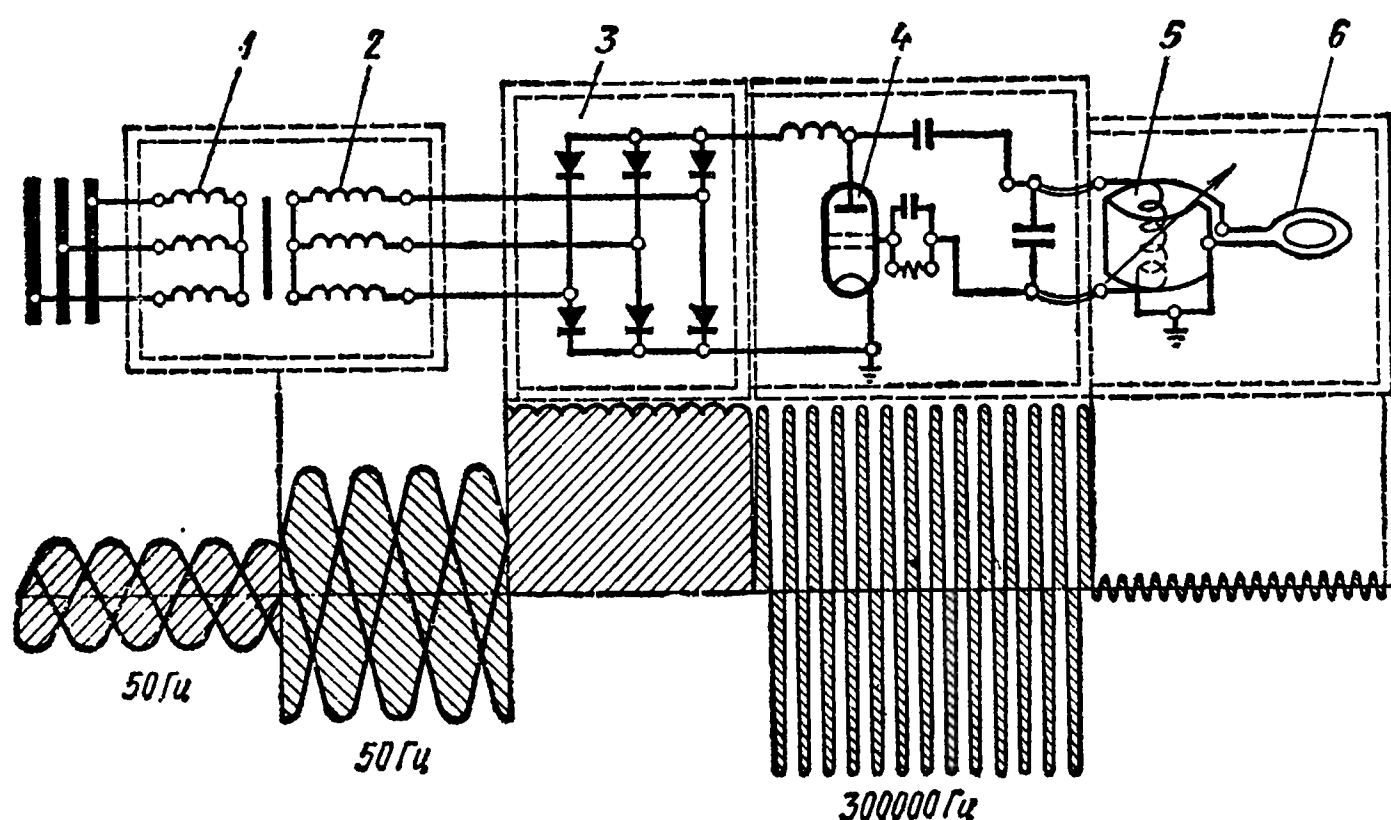


Рис. 22. Схема преобразования тока и работы лампового генератора

Во вторичной обмотке 2 трансформатора напряжение тока повышается до 8000 В. После этого переменный ток проходит через газотронный выпрямитель 3 и преобразуется в постоянный ток высокого напряжения, который подается на анод 4 генераторной лампы, дающей ток высокой частоты. Далее ток подвергается преобразованию в высокочастотном трансформаторе 5, во вторичной обмотке которого напряжение понижается до 1000 В. После этого ток поступает в индуктор 6, в котором производится нагрев паяемых деталей.

Технические характеристики некоторых ламповых генераторов приведены в табл. 18.

Наряду с ламповыми генераторами используют специальные установки для высокочастотной пайки, например, установку ЛМ-4199 для пайки изделий т. в. ч. в среде водорода. В ее комплект входят станок для пайки типа А322.05, генератор типа А624.01 и установка для пайки в среде водорода [8].

Техническая характеристика установки ЛМ-4199

Давление, кгс/см ² :	
водорода	0,05
азота	0,05
Расход воды, л/мин	0,3
Количество колпаков	8

Габаритные размеры, мм:	
длина	1665
ширина	970
высота	620

Для массового производства паяных изделий применяют высокопроизводительные установки, работающие по автоматическому циклу. Полуавтоматическую установку ПС-1 используют для индукционной вакуумной пайки электродов к корпусам свечей зажигания двигателей внутреннего сгорания.

18. Ламповые генераторы [29]

Тип	Номиналь- ная колеба- тельная мощность, кВт	Рабочая частота, кГц	Напряже- ние пи- тающей сети, В	Габаритные размеры, мм		
				Длина	Ширина	Высота
ЛГЗ-10А ЛЗ1-25	8 25	300—450 66	220/380	1130 2390	1100 2000	2120 2300
ЛГ-30А ЛГ-30Б	20	150—250		—	—	—
ЛПЗ-37 ЛП-37 ЛЗ-37	30			4020	3500 2700 2200	2250
ЛГ-60А ЛГ-60Б	40	150—250		—	—	—
ЛПЗ-67 ЛП-67 ЛЗ-67	60	60—74		4020	3500 2700 2200	2250
ЛЗ-107	100			4120		
ЛЗ-107Б		66	4040	2105		
ЛП1-160 ЛЗ-167	160	440 66	380	2420 3097	2500	
ЛЗ-207	200	60—74	220/380	4620	2800	2250

Полуавтомат оснащен высокочастотной установкой ЛЗ-2-67, подвижным одновитковым индуктором, двумя вакуумными системами — предварительной откачки и постоянной откачки в процессе пайки изделий.

Техническая характеристика установки ПС-1

Напряжение питающей сети, В	380	Габаритные размеры, мм:	
Мощность высокочастотной установки, ЛЗ-2-67, кВт	60	диаметр	1000
Температура пайки, °С	1150	высота	940
Вакуум, мм рт. ст.	10 ⁻³	Масса, т	0,7

Для осуществления индукционной вакуумной пайки т. в. ч. используют также схему, основанную на применении многовиткового индуктора 1, колпака из кварцевого стекла 2, паемого изделия 3, подставки 4, уплотнения 5 и охлаждаемого фланца 6 (рис. 23). В случае пайки т. в. ч. изделий в контролируемой атмосфере взамен колпака используют контейнер 4 (рис. 24) с песчаным уплотнением 5, многовитковый индуктор 1, подставку 3. После продувки контейнера защитным газом до полного удаления воздуха включают высокочастотный генератор. Температуру нагрева в контейнере контролируют термопарой, установленной непосредственно на паемом изделии 2. Процесс пайки легко поддается автоматизации.

Машинные генераторы дают токи частотой 2—15 кГц и представляют собой установку из электродвигателя трехфазного тока и соединенного с ним генератора. Схема преобразования тока и работы машинного генератора приведена на рис. 25. Ротор генератора 2 повышенной частоты приводится во вращение электродвигателем 1. Параллельно включается электродвигатель 3 возбудителя 4. Возбуждение регулируют реостатом 5. Колебательный контур подключен к генератору 2 и представляет собой конденсаторную батарею 6, соединенную параллельно с первичной об-

моткой трансформатора токов повышенной частоты 7. Вторичная обмотка этого трансформатора 8, понижающего напряжение, соединяется с индуктором 9, внутри которого помещается паяемое изделие 10.

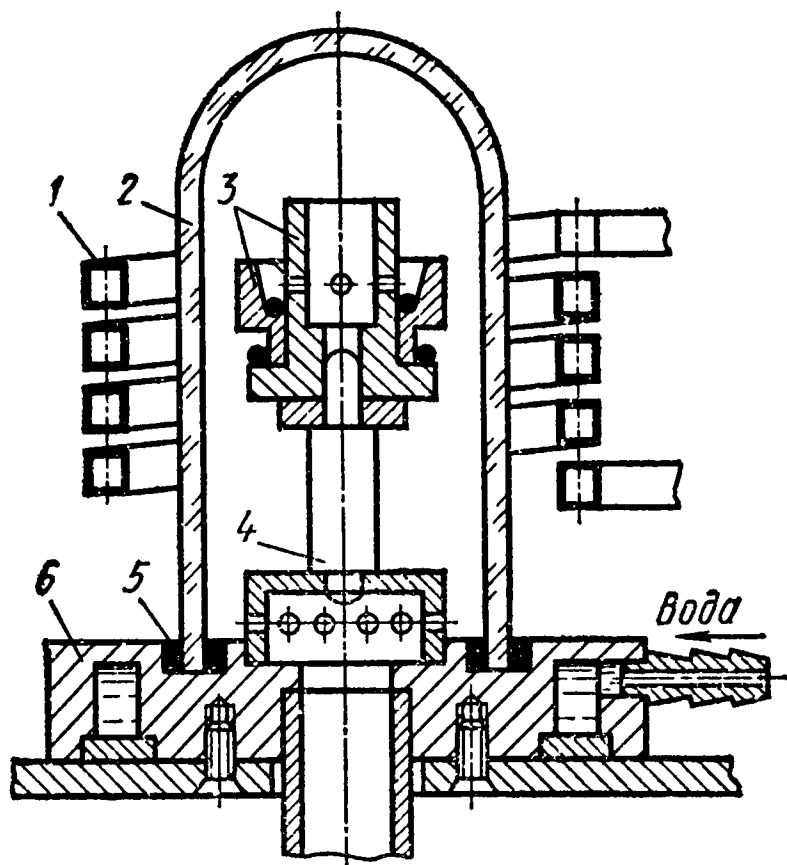


Рис. 23. Схема индукционной пайки в вакууме

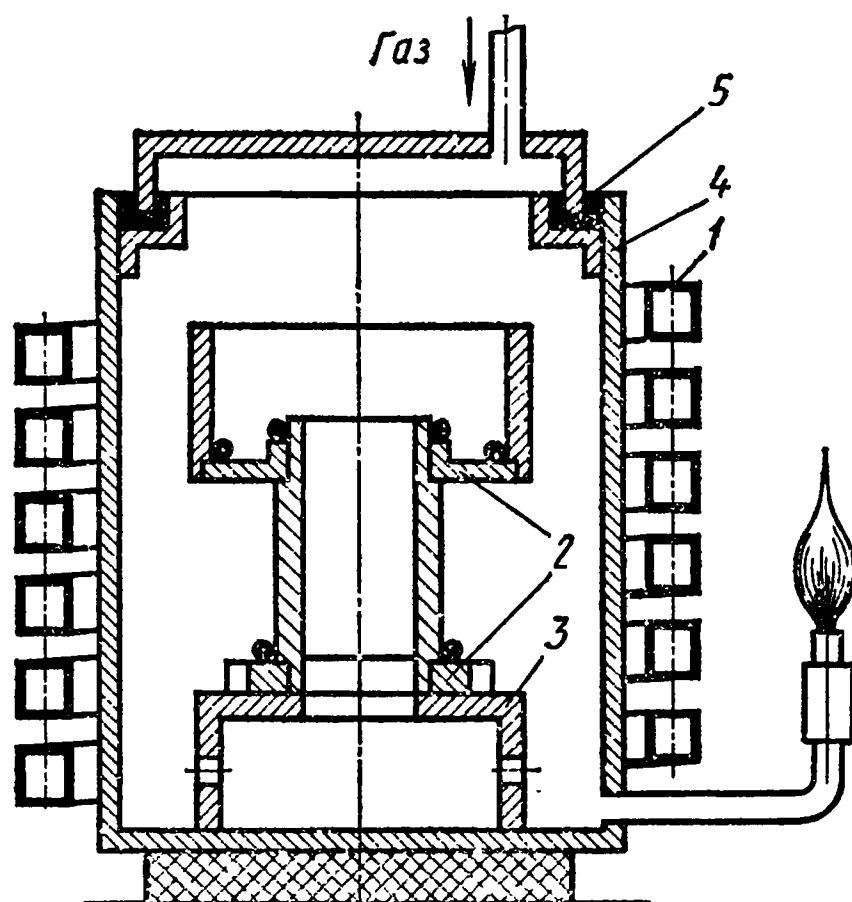


Рис. 24. Схема индукционной пайки в контейнере с защитной атмосферой

Технические характеристики некоторых машинных генераторов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 19.

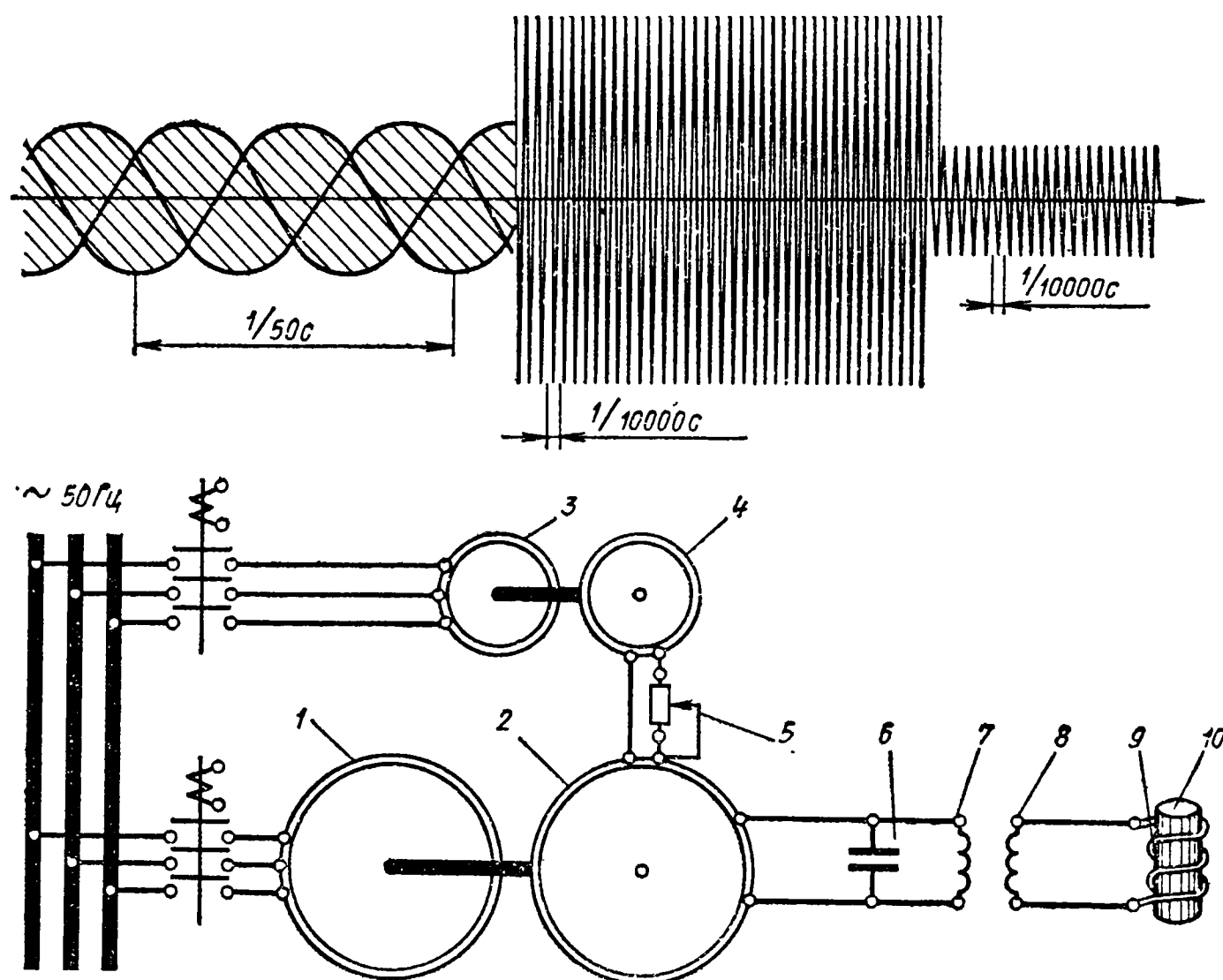


Рис. 25. Схема преобразования тока и работы машинного генератора

Механизацию и автоматизацию процесса пайки чаще всего обеспечивают устройствами карусельного типа. Схема полуавтомата для индукционной пайки с пневматическим управлением показана на рис. 26. Пневматическая система состоит из трубопроводов, водоотстойника 1, масленки для подачи распыленного масла 2, регу-

19. Машинные генераторы

Параметры	ПВ50/2500	ПВС-100/2500-1	ПВ-100/8000-1	ВГО-500/2500
Генератор				
Мощность, кВт	50	100	100	500
Напряжение, В	750/375	750/375	750/375	1000/500
Сила тока, А	74/148	148/296	148/296	500/1000
Частота, Гц:				
при номинальной частоте вращения	2650	2650	—	—
при синхронной частоте вращения	—	—	8000	2500
Двигатель				
Мощность, кВт	60	125	130	700
Напряжение, В	220/380	220/380	220/380	3000/6000
Частота, Гц	50	50	50	50
Масса, т	2,1	3,0	4,0	7,23

ляторов давления 3, золотников 4, распределительного устройства 5 для поддува воздуха и шпинделя 6, цилиндра поворота 7, фиксатора 8 и цилиндра подъема шпинделей 9. Узел поворота производит периодический поворот карусели. Шток 10 цилиндра 7 перемещает рейку 11, которая заставляет поворачиваться зубчатый сектор 12. Укрепленная на нем защелка 13 поворачивает храповое колесо 14 на

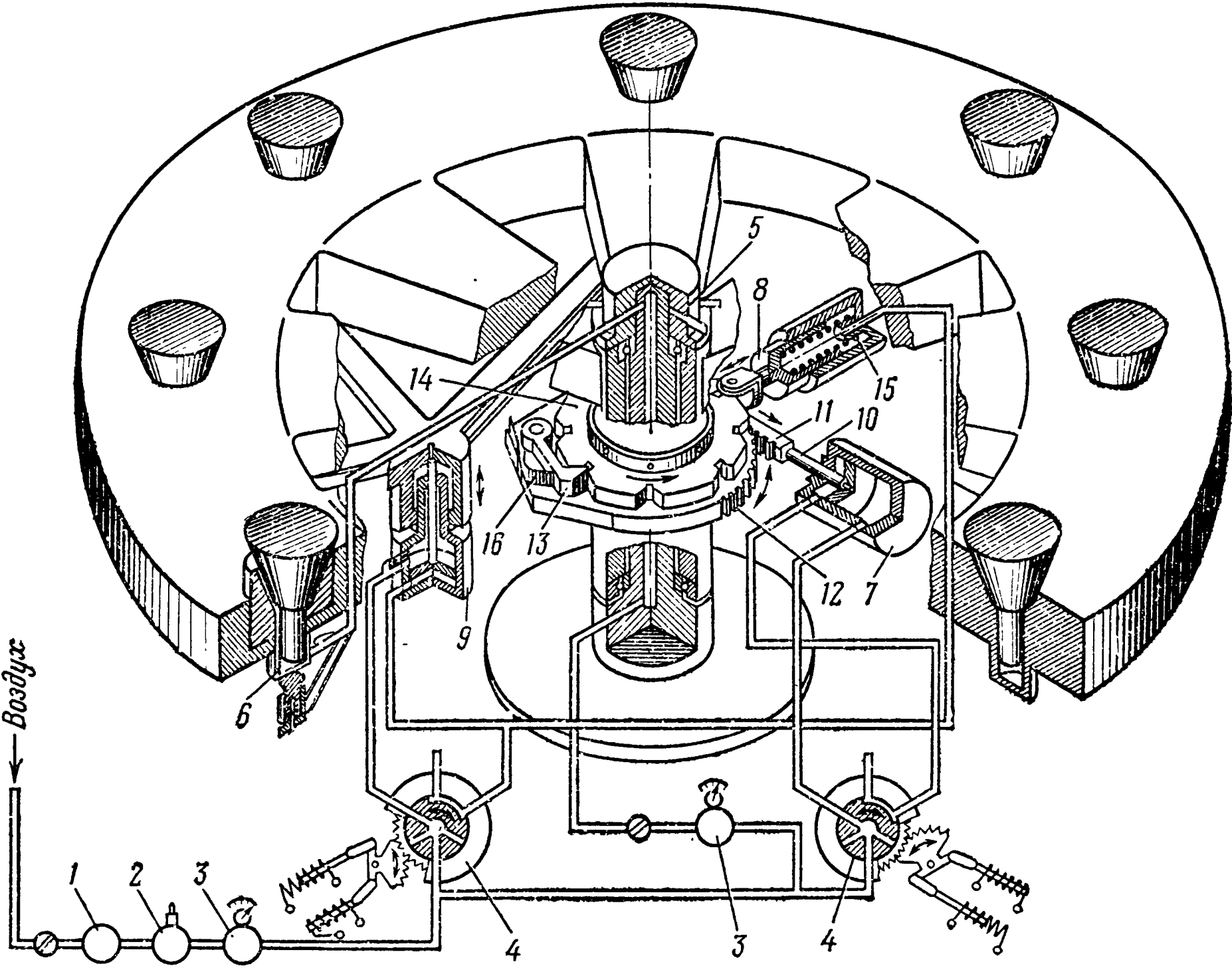


Рис. 26. Схема полуавтомата для индукционной пайки изделий с пневматическим управлением

один зуб. При этом ролик фиксатора 8 отходит, сжимая пружину 15. Защелка постоянно поджата пружиной 16. При обратном ходе штока рейка, поворачивая сектор, заставляет защелку повернуться в исходное положение. В цилиндр фиксатора при этом будет подан сжатый воздух, благодаря чему фиксатор надежно удерживает храповое колесо на месте, а с ним и всю карусель [27].

В ряде случаев для производства паяных изделий успешно применяют индукционные установки промышленной частоты с машинными генераторами, в которых роль муфеля выполняют стенки контейнера.

ИНДУКТОРЫ

При индукционной пайке металлов наибольшее количество тепла выделяется на поверхности нагреваемого изделия. Глубину проникновения переменного тока *h* определяют по формуле

$$h = \frac{c}{2\pi \sqrt{\mu \sigma f}}$$

где *c* = 3 · 10¹⁰ см/с — электродинамическая постоянная (скорость света в пустоте); *μ* — магнитная проницаемость; *σ* — удельная электрическая проводимость; *f* — частота тока.

Для практических целей более удобно выражение

$$h = \frac{k}{\sqrt{f}}$$

где *k* — коэффициент, зависящий от материала и температуры. Глубину проникновения тока получаем в мм.

Значение коэффициента *k* зависит от материала:

Сталь низкоуглеродистая при температуре более 780°С (выше точки Кюри)	600
Сталь малоуглеродистая при температуре 20°С	20
Медь	70
Алюминий	80

При проектировании и применении индукторов необходимо учитывать зависимость глубины проникновения тока от его частоты (табл. 20).

При одной и той же частоте немагнитные материалы нагреваются значительно медленнее, чем ферромагнитные, в результате того, что величина *μ* для немагнитных

20. Глубина проникновения тока (мм) в зависимости от частоты

Частота, Гц	Сталь		Медь	Алюминий
	до точки Кюри	после точки Кюри		
50	2,4	92	9,5	1,4
2 · 10 ³	0,5	14	1,5	1,8
10 ⁴	0,2	6	0,67	0,8
10 ⁵	0,07	2	0,21	0,25
10 ⁶	0,02	0,6	0,07	0,08
10 ⁸	0,002	0,06	0,007	0,008

прямой и обратной ветвями токопровода должно быть больше, чем учетверенная величина зазора между индуктором и нагреваемой поверхностью. Для повышения электрического к. п. д. плоских индукторов применяют магнитопроводы из листов электротехнической стали или феррита (рис. 27).

материалов равна примерно единице и в них не наблюдается резко выраженного скин-эффекта. В стали, например, удельная поглощаемая мощность почти в 8 раз больше, чем в меди [14]. Поэтому при пайке существенны ширина индуктирующего провода и величина зазора между рабочей поверхностью индуктора и поверхностью нагреваемых деталей.

В нагреваемой детали индуктируются токи от прямой и от обратной ветвей индуктора. Это ослабляет результирующий ток и снижает электрический к. п. д. индуктора. Поэтому расстояние между

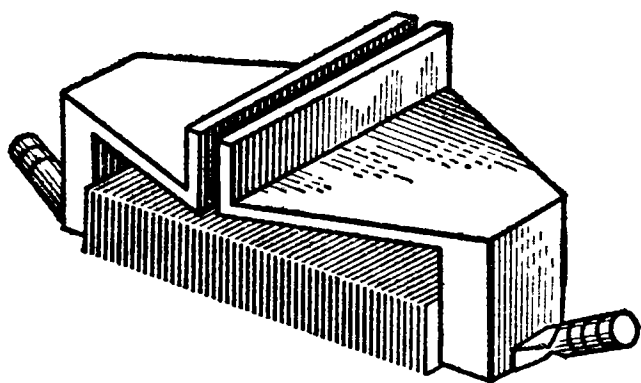


Рис. 27. Индуктор с магнитопроводом для нагрева плоских поверхностей

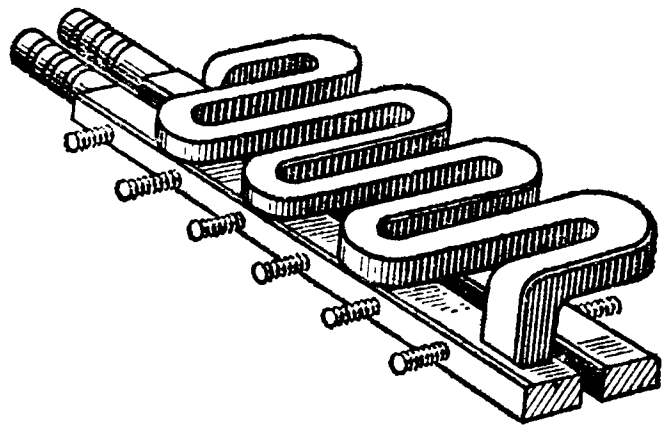


Рис. 28. Зигзагообразный индуктор для нагрева развитой плоской поверхности

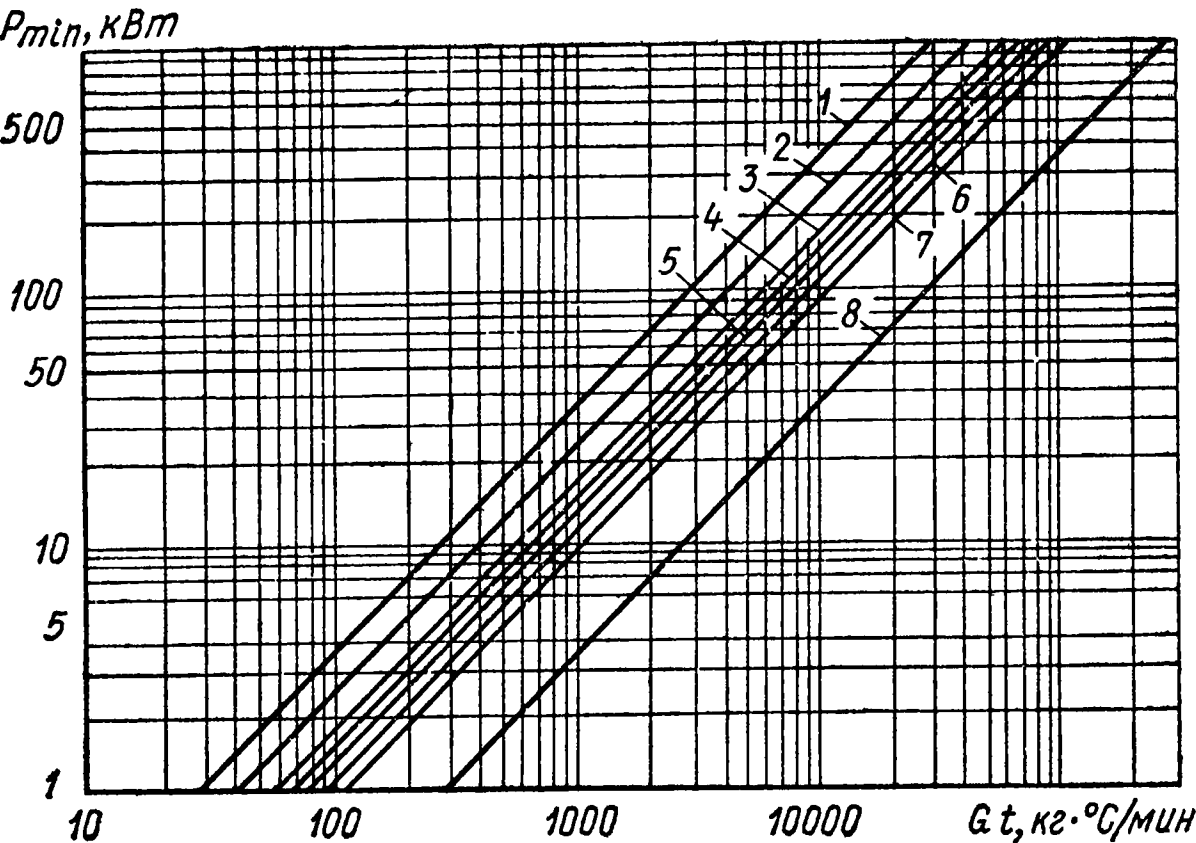
В ряде случаев для одновременного нагрева развитой плоской поверхности применяют зигзагообразные индукторы (рис. 28). Индукторы могут быть различной конфигурации в зависимости от формы паяемых изделий.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Основными параметрами установки для индукционной пайки являются колебательная мощность генератора и частота тока. Для определения этих параметров исходными являются форма и размеры нагреваемого объекта, материал, требуемая производительность, температура пайки и др.

ГОСТ 9952—70*, 10789—72 и нормами [23] установлены значения (шкалы) основных параметров высокочастотных установок. В частности, предусмотрены

Рис. 29. Минимальная колебательная мощность генератора P_{min} при сквозном индукционном нагреве в зависимости от производительности G и температуры нагрева t :
1 — алюминий; 2 — графит; 3 — медь; 4 — сталь (при высокотемпературной пайке); 5 — сталь (при низкотемпературной пайке); 6 — латунь и серебро; 7 — бронза 8 — свинец



следующие значения номинальных колебательных мощностей: 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1,0 кВт и далее, получаемые умножением этих величин на 10, 100, 1000.

Значения к. п. д. генератора установлены в зависимости от рабочей частоты.

Рабочая частота, МГц	< 1	1—30	> 30
К. п. д.	0,65	0,60	0,5

Рабочие частоты установок, установленные нормами, и допустимые пределы их отклонения приведены в табл. 21.

Применение для высокочастотных установок других частот без специального разрешения Межведомственной комиссии по радиочастотам при Министерстве связи СССР запрещено.

При выборе установок необходимо учитывать, что колебательная мощность генератора должна покрыть полезную мощность на нагрев детали или часть ее, тепловые потери, электрические потери в индукторе, электрические потери по пути передачи энергии от зажимов генератора до зажимов индуктора.

Кривые для определения колебательной мощности генератора при сквозном нагреве металлов исходя из требуемой производительности и температуры даны на рис. 29.

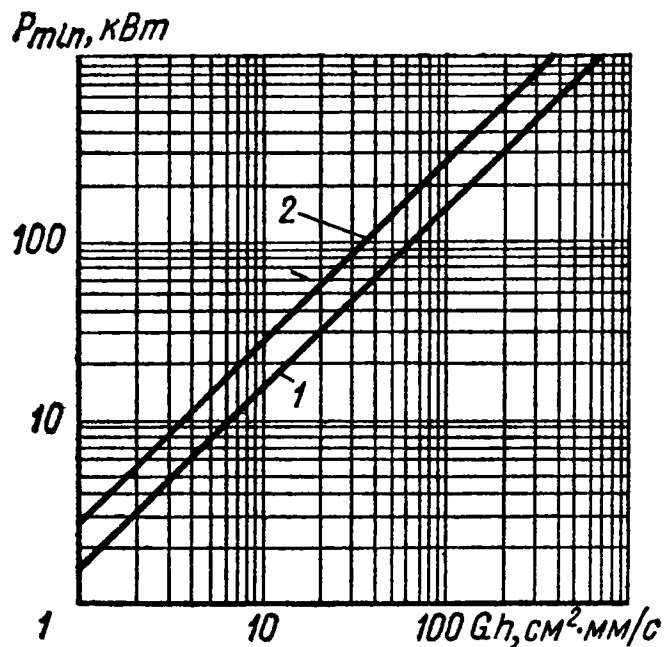


Рис. 30. Минимальная колебательная мощность генератора P_{min} при пайке тонкостенных изделий и местном нагреве под пайку в зависимости от глубины нагрева h и производительности G :
1 — одновременный нагрев всей поверхности; 2 — непрерывно-последовательный нагрев

21. Рабочие частоты установок и допустимые отклонения

Рабочая частота, кГц	Допустимое отклонение, % ($\pm$)	Рабочая частота, МГц	Допустимое отклонение, % ($\pm$)
18	7,5	13,56	1
22	7,5	27,12	
44	10	40,68	
66	12	81,36	
440	2,5	152,5	
880	1,0	300,0	
1760	2,5		2,0
5280	2,5	2 375,0	
		22 125,0	0,5

Кривые построены для оптимального режима работы установки при правильно выбранной частоте для случая пайки изделий внутри соленоидного индуктора с относительно небольшими зазорами между индуктором и изделием.

После определения требуемой минимальной колебательной мощности генератора следует принять ближайшее большее значение по стандартной шкале мощностей.

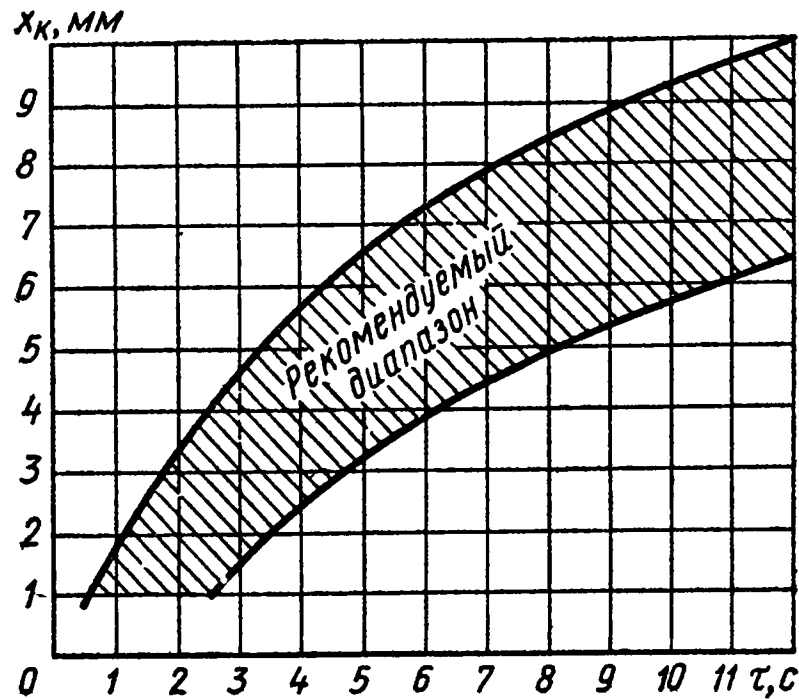


Рис. 31. Зависимость глубины прогрева изделия x_k от времени нагрева τ при правильно выбранном режиме

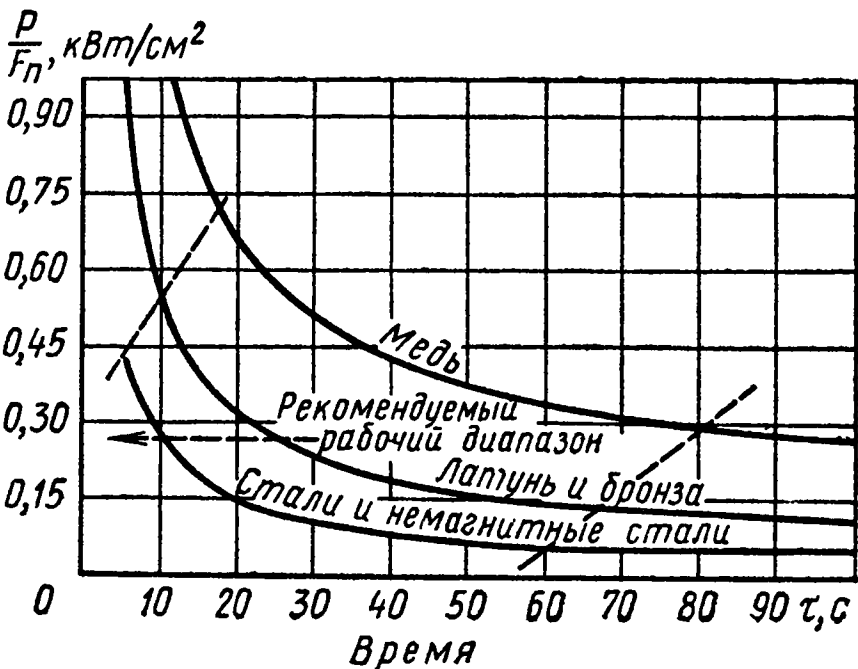


Рис. 32. Колебательная мощность генератора на 1 см² сечения шва при низкотемпературной пайке (при 190° С)

Это относится ко всем приводимым ниже кривым выбора колебательной мощности; полученные по кривым значения соответствуют минимальным величинам требуемой мощности.

Кривые для выбора мощности генератора при пайке тонкостенных изделий с местным нагревом даны на рис. 30, а зависимость времени нагрева от глубины прогрева — на рис. 31.

На рис. 32 и 33 показаны кривые для определения рекомендуемой колебательной мощности генератора при пайке различных металлов низкотемпературными и высокотемпературными припоями на 1 см^2 сечения соединяемых элементов.

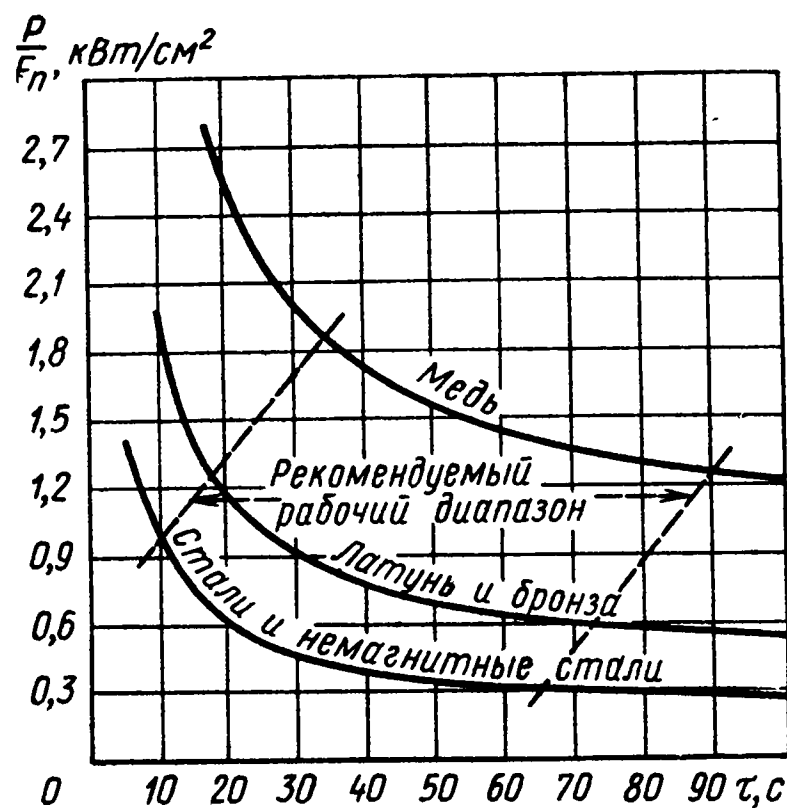
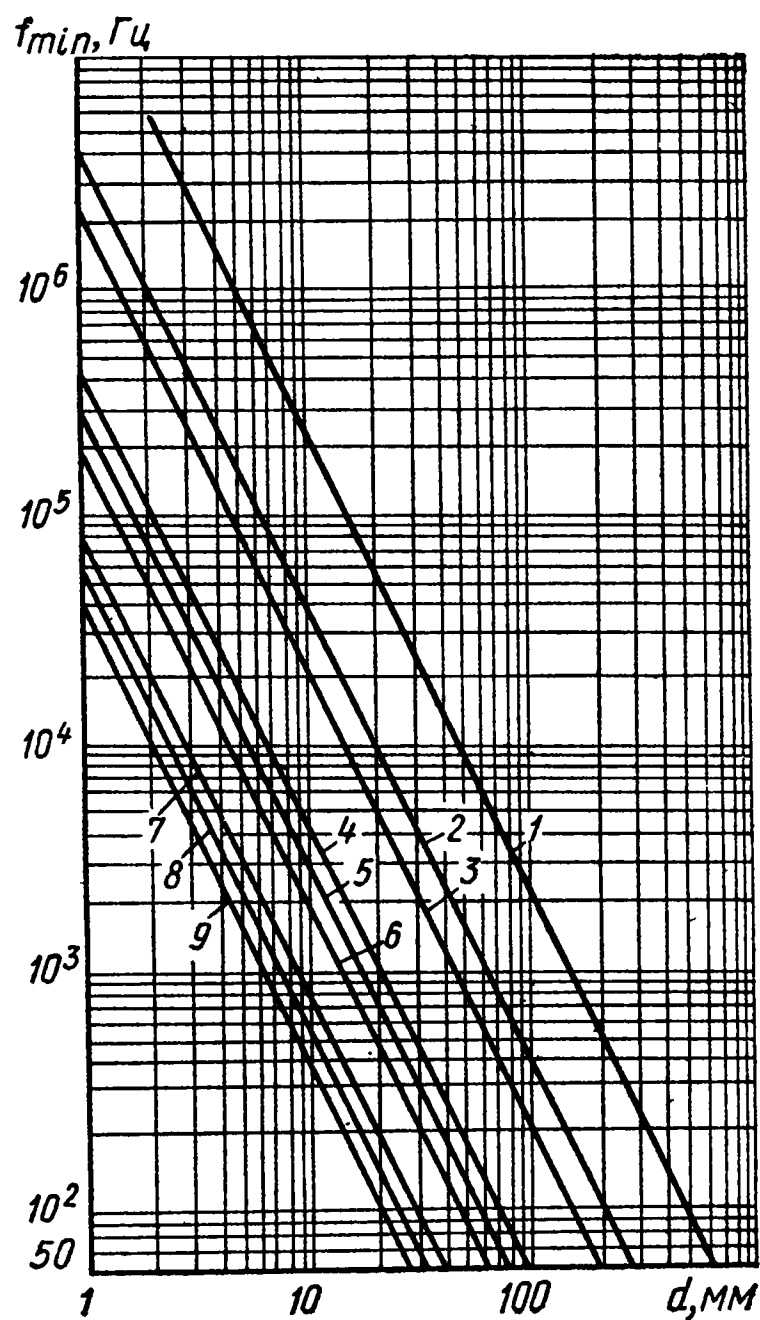


Рис. 33. Колебательная мощность генератора на 1 см^2 сечения шва при высокотемпературной пайке (при 705°C)

Рис. 34. Зависимость минимальной частоты $f_{\min}$ при индукционном сквозном нагреве, а также при поверхностном нагреве от диаметра (толщины) детали d , если глубина нагреваемого слоя составляет не менее $10\% d$:

1 — графит; 2 — сталь горячая ($900-1100^\circ \text{C}$); 3 — сталь немагнитная; 4 — латунь горячая; 5 — алюминий горячий (600°C); 6 — латунь холодная; 7 — алюминий холодный; 8 — медь; 9 — серебро



При сквозном нагреве снижение частоты увеличивает глубину проникновения тока и тем самым снижает время, необходимое для равномерного сквозного нагрева детали, и повышает тепловой к. п. д. нагрева. С другой стороны, снижение частоты ниже определенного значения может повести к резкому падению эффективности передачи энергии от индуктора в деталь. Следовательно, при индукционном сквозном нагреве паемых деталей существуют оптимальные значения частоты (рис. 34).

ПАЙКА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕМ

В качестве источников нагрева при пайке электросопротивлением применяют сварочные трансформаторы или специальные электрические машины. Электрические сварочные машины для контактной пайки обеспечивают получение тока до десятков тысяч ампер при низких напряжениях ($0,5-10 \text{ В}$).

Установки для пайки электросопротивлением. Принципиальная схема установки для пайки блока магнетрона *A* с крышками *B* показана на рис. 35. Понижающий сварочный трансформатор *1* имеет секционированную первичную обмотку, а вторичную — из одного витка. Напряжение между электродами *2* регулируется трансформатором. Паяемый узел с двумя графитовыми нагревателями *3* по обе его стороны вставляют между электродами *2*, и в таком виде «пакет» устанавливают на неподвижном основании *4* с изолирующей прокладкой *6*. Сверху «пакет» сжимают подвижным штоком *5*, под действием которого происходит сжатие паемых деталей при плавлении.

нии припоя. Для предотвращения окисления внутренней полости прибора в нее подается углекислый газ с парами спирта, поступающий через резервуар 7 [14].

В промышленности используют также специальные полуавтоматические установки для пайки электросопротивлением в защитной среде.

Схема установки для пайки электросопротивлением обмоток короткозамкнутого ротора электродвигателя показана на рис. 36 [1].

Схема установки для пайки концов статорных обмоток дана на рис. 37. Вертикальная стойка 10, на которой укреплен шарнир 11, поворачивает кронштейн 9 вокруг оси стойки. Шарнир 7 позволяет кронштейну 6 поворачиваться на угол 250° относительно оси кронштейна 9. На свободном конце кронштейна 6 укреплена переходная головка 5, обеспечивающая свободный поворот паяльной головки 1—2 на угол 360° .

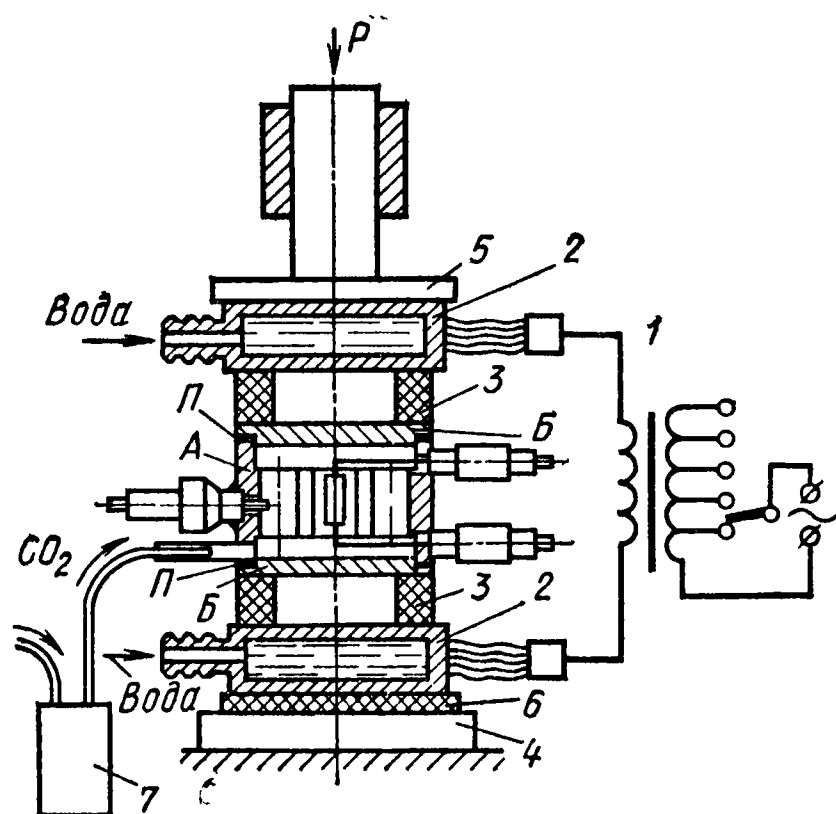


Рис. 35. Принципиальная схема установки для пайки электросопротивлением блока магнетрона А с крышками Б:

1 — трансформатор; 2 — медные, охлаждаемые водой электроды; 3 — графитовые нагреватели; 4 — нижнее неподвижное основание; 5 — верхний подвижный шток; 6 — изолирующая прокладка; 7 — резервуар для обогащения CO_2 парами спирта; Р — усилие осадки деталей при расплавлении припоя; П — припой

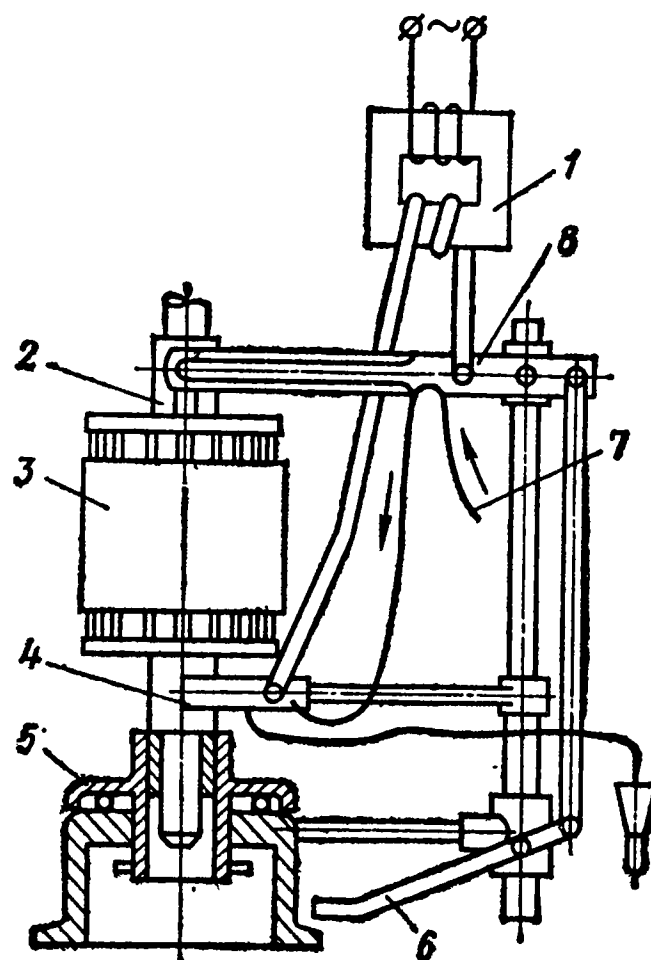


Рис. 36. Схема установки для пайки электросопротивлением обмоток короткозамкнутого ротора:

1 — нагревательный трансформатор; 2 — графитовый электрод; 3 — ротор; 4 — контакт, которым соединяют второй конец вторичной обмотки трансформатора с валом ротора; 5 — поворотный стол; 6 — рычаг для прижатия графитового электрода к короткозамыкающему кольцу ротора; 7 — шланг для воды; 8 — подвижный рычаг с держателем графитового электрода

В нормальном положении паяльная головка находится на высоте 1 м от уровня пола. Изменение этого расстояния производят поворотом гайки 4, упирающейся в пружину 3, под действием которой петля 8 дает свободное перемещение паяльной головке по вертикали. Из-за большой плотности тока при пайке токопроводы и электроды охлаждаются водой из сети 12. Напряжение во вторичной цепи регулируется изменением числа витков первичной обмотки нагревательного трансформатора 13 посредством переключателя 14 [17].

В установке для пайки электросопротивлением петушков коллектора к его ламелям один из электродов прижимается к ламели, другой — непосредственно к петушку (рис. 38). На стойке установлен качающийся рычаг 1 с угольным элементом нагрева, который с помощью втулки 3 на штанге 2 фиксирует контактную пластину 4 по месту пайки. Второй электрод устанавливается в рабочее положение пайки с помощью стояка, на котором установлены кронштейны 5 и 6. При действии пружины 7 электрод контактирует с ламелью коллектора. Питание установки осуществляется

через трансформатор 9 с переключателем 10 и регулируется педалью включения 8. Продолжительность пайки составляет 1—2 с [19].

Пайку коллекторных соединений производят и на автоматических установках. Автомат для припайки концов секций обмоток к коллекторам электрических машин

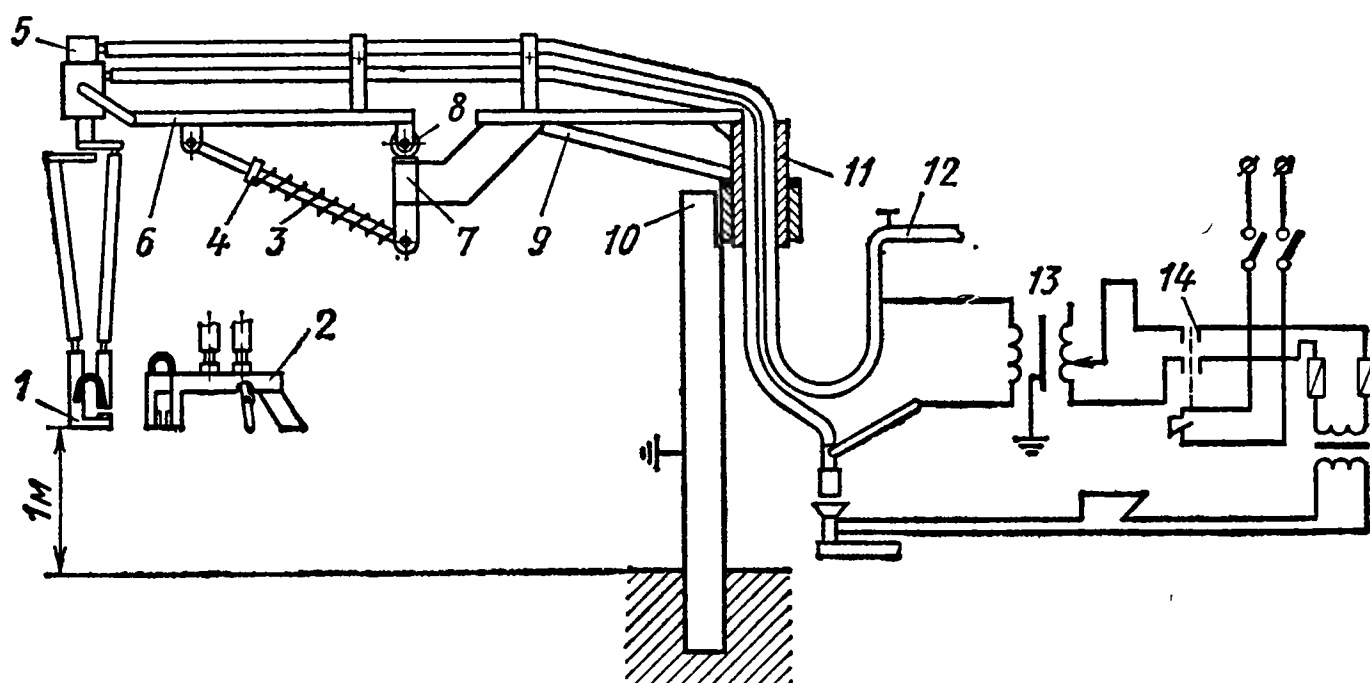


Рис. 37. Схема установки для пайки электросопротивлением концов статорных обмоток

отличается тем, что в нем применена следующая система, выполненная в виде электроконтактных игл, скользящих по ламелям коллектора. Эта система осуществляет управление автоматом с помощью реле времени.

На рис. 39 показан автомат АПК-1. Якорь 5 устанавливают в центрах передней 1 и задней 4 бабок. Поворот якоря может осуществляться вручную — рукояткой 10 или автоматически — от электродвигателя 7 через электромагнитную муфту 9. Припайка концов секций обмоток к коллекторам осуществляется контактным нагревом от электродов 3. Электроды укреплены на штоке пневмоцилиндра 2, подвод воздуха в который регулируется электромагнитным клапаном 6. Следящая система 11, состоящая из игл 12, скользящих по ламелям 13, позволяет точно фиксировать положение электрода 3. При нажатии пусковых кнопок на пульте управления включается электродвигатель 7 и посредством электромагнитной муфты 9 начинает вращаться шпиндель с якорем 5. Когда контактные иглы 12 следящей системы 11 попадут на межламельную изоляцию, электромагнитная муфта 9 отключится и поворот шпинделя прекратится. Для предотвращения недопустимого поворота шпинделя после подачи команды на остановку в автомате применена тормозная электромуфта 8. После остановки шпинделя контактная игла 12 подает команду на реле времени, которое размыкает цепь электромагнитного клапана 6. При этом клапан 6 открывается, воздух поступает в пневмоцилиндр 2, электроды 3 пе-

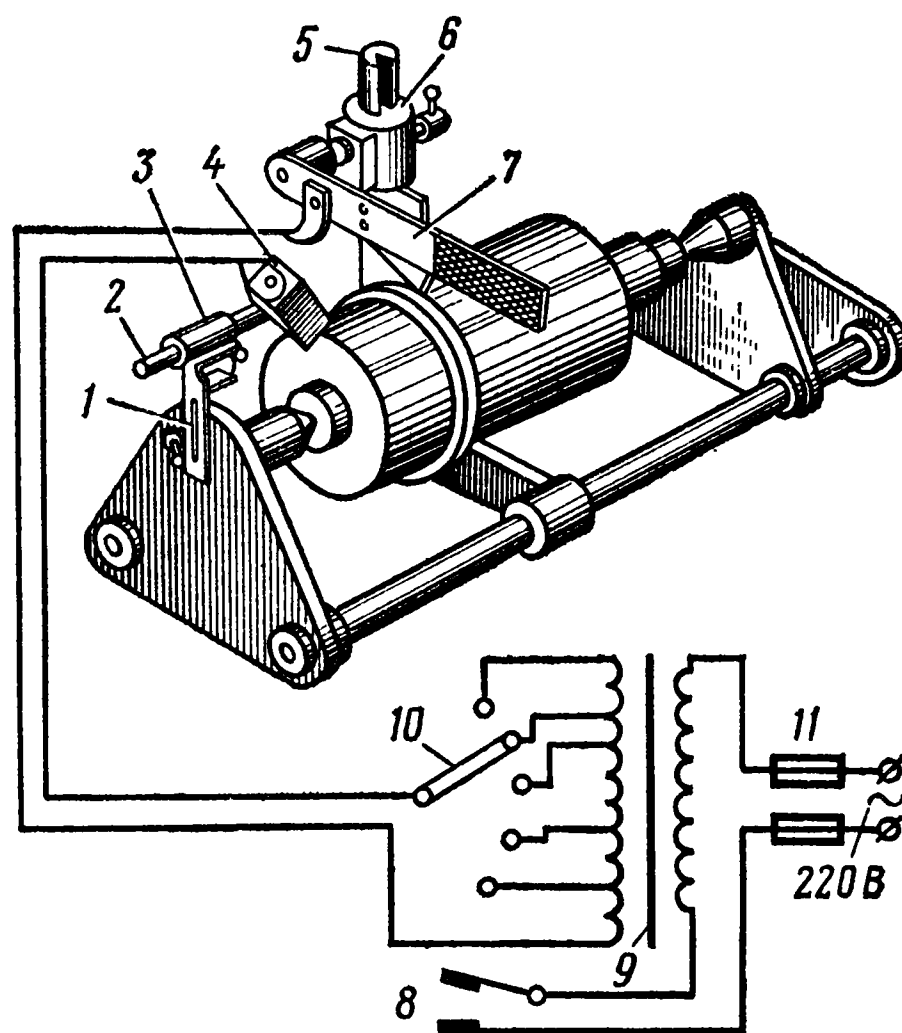


Рис. 38. Установка для пайки электросопротивлением петушков к ламелям коллектора:

1 — качающийся рычаг с угольным элементом нагрева; 2 — штанга; 3 — втулка; 4 — медная контактная пластина; 5 и 6 — кронштейны; 7 — пружина; 8 — педаль включения; 9 — трансформатор; 10 — переключатель; 11 — предохранители

При нажатии пусковых кнопок на пульте управления включается электродвигатель 7 и посредством электромагнитной муфты 9 начинает вращаться шпиндель с якорем 5. Когда контактные иглы 12 следящей системы 11 попадут на межламельную изоляцию, электромагнитная муфта 9 отключится и поворот шпинделя прекратится. Для предотвращения недопустимого поворота шпинделя после подачи команды на остановку в автомате применена тормозная электромуфта 8. После остановки шпинделя контактная игла 12 подает команду на реле времени, которое размыкает цепь электромагнитного клапана 6. При этом клапан 6 открывается, воздух поступает в пневмоцилиндр 2, электроды 3 пе-

ремещаются к коллектору и с определенным усилием нажимают на его ламель, происходит включение электрического тока, нагрев и пайка. Продолжительность пайки регулирует реле времени, подающее команду на подъем электродов в исход-

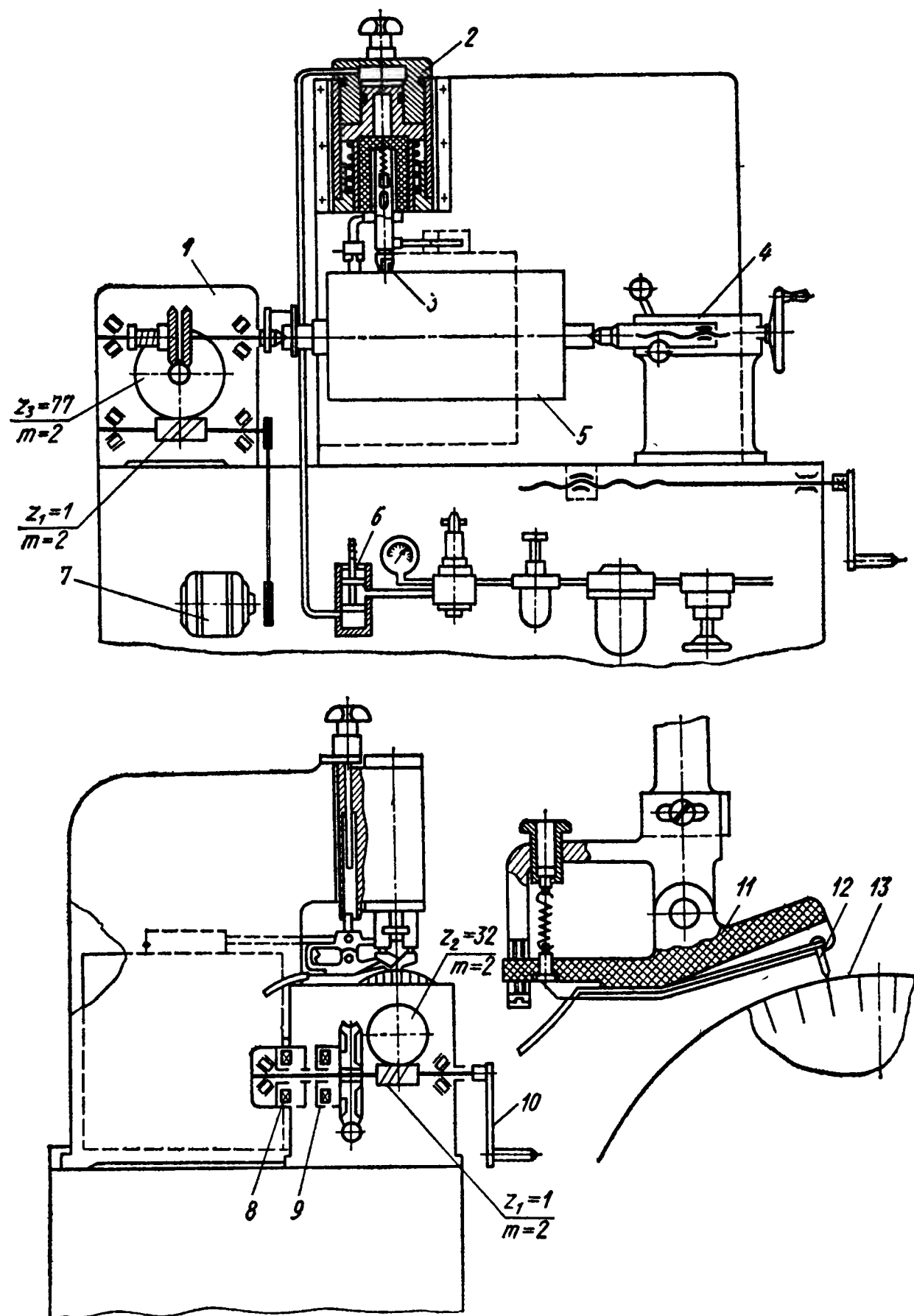


Рис. 39. Схема автомата типа АПК-1 для пайки концов секций обмоток к коллекторам электрических машин

ное положение, после чего включается микро-переключатель, дающий команду на поворот шпинделя с якорем 5 на одну ламель. Цикл работы повторяется до полного оборота коллектора [2].

Техническая характеристика автомата АПК-1

Мощность трансформатора, кВт . . .	50	Производительность пайки ламелей, шт./ч	1200
Напряжение питающей сети, В . . .	380	Габаритные размеры, мм:	
Габариты паяемых изделий, мм:		ширина	780
диаметр	50—200	длина	1360
длина	25—200	высота	1340
толщина ламели	1,5—10	Масса, т	0,8
Цикл пайки одной ламели, с	1—3		

В качестве электродов при пайке электросопротивлением получили распространение угольные электроды марок ЭГ2, ЭГ8 и др., а также из вольфрама и жаростойких сталей и сплавов.

Для пайки электросопротивлением рационально иногда использовать специальные клещи [17].

СПЕЦИАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПАЙКИ

К специальному оборудованию для пайки относят установки, обеспечивающие кроме нагрева давление с заданным усилием. К такому типу средств нагрева относится, например установка У-344 для диффузионной пайки в вакууме.

Техническая характеристика установки У-344

Максимальные размеры паяемых изделий, мм:	Максимальная температура нагрева изделия в рабочем объеме, °С
наружный диаметр	2000
длина	Скорость подъема штока, мм/мин
Объем рабочей камеры, л	1—5
Максимальная степень разрежения, мм рт. ст.	Габаритные размеры, мм:
. $2 \cdot 10^{-5}$	длина
	ширина
	высота
	2725
	1345
	2485

Установка У-184М предназначена для пайки лопаток газовых турбин в вакууме с последующим их соединением с диском. Установка представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру диаметром 650 мм и длиной 510 мм, к которой крепят высоковакуумный агрегат ВА-2-3 и механизм вращения изделия.

Техническая характеристика установки У-184М

Диаметр соединяемых изделий, мм	100—400	Время вакуумирования, мин	10
Производительность изделий в смену:		Число оборотов вращателя в минуту	9
венцов	14	Габаритные размеры, мм:	
венцов к дискам	14	длина	2000
Температура нагрева изделия, °С	1200	ширина	1350
Рабочий вакуум, мм рт. ст.	10^{-5}	высота	2190
Объем камеры, м³	0,33	Масса, т	2,2

Установка У-268 предназначена для пайки в вакууме биметаллических трубных заготовок. Она состоит из вакуумной камеры, вакуумной системы, шкафа управления, шкафа конденсаторов, индуктора, механизма подачи внутренней гильзы и высокочастотного генератора.

Техническая характеристика установки У-268

Размеры трубных заготовок, мм:	Средняя производительность, заготовок в смену
наружный диаметр	14
внутренний диаметр	Габаритные размеры (без генератора), мм:
Характеристика высокочастотного генератора ПВС-100/2500:	длина
мощность, кВА	2300
частота, Гц	3200
Рабочий вакуум, мм рт. ст.	2000
. 10^{-5}	Масса, т
	2,5

Рассмотренные выше установки разработаны Институтом электросварки им. Е. О. Патона [25].

Для пайки изделий из металлов и металлов с керамикой под давлением в контролируемой атмосфере при температурах до 1400° С применяется установка 600Э521. В качестве контролируемой атмосферы в ней служат водород, азот, формирующий газ (смесь азота с водородом).

Установка оснащена двумя рабочими камерами, пультом управления и гидроприводом.

Габариты рабочей камеры (температура нагрева до 1200° С) позволяют производить пайку изделий диаметром до 160 мм и высотой до 250 мм, габариты другой камеры с рабочей температурой до 1400° С обеспечивают пайку изделий диаметром до 100 мм и высотой до 150 мм. Усилие сжатия паяемых деталей от гидропривода составляет 100—7000 кгс.

Нагревательные элементы выполнены из прутков молибдена диаметром 5,0 мм. Внутри рабочих камер установлены экраны из листового молибдена и никеля. В верхней части рабочих камер размещены взрывные клапаны, предотвращающие повреждение установки при образовании взрывоопасной газовой смеси.

Смотровые гляделки в рабочих камерах позволяют наблюдать за процессом пайки. В нижней части рабочих камер имеется по три термопарных ввода. Контроль температур осуществляют с помощью вольфрам-рениевых термопар и электронного потенциометра.

На нижней наклонной панели пульта управления установлены вентили газовой системы, дроссели и вариаторы напряжения для регулировки скорости нагрева увлажнителя контролируемой атмосферы [31].

Основные технические характеристики применяемых в промышленности установок для пайки под давлением приведены в табл. 22.

22. Установки для пайки изделий под давлением

Параметры	A306-08	A306-10	A306-11	A306-20	СЖМ2327000
Максимальная температура, °С	1300	1300	1300	1100	1100
Рабочая среда:					
вакуум, мм рт. ст. . .	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	—	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
контролируемая атмосфера, давление, кгс/см ²	—	—	Водород 0,04, азот 0,008,		—
Диапазон рабочих усилий, кгс:					
I	100—1000	5—500	100—1000	50—1000	50—1000
II	1000—10 000	—	1000—10 000	1000—10 000	1000—10 000
Привод механизма сжатия	Гидравлический	Механический	Гидравлический		
Габариты рабочей зоны, мм:					
высота	180	100	100	180	180
диаметр	120	80	80	120	120
Способ нагрева	Индукционный	Радиационный		Индукционный	
Источник нагрева	Генератор в. ч ИО60.011, 25 кВт	Вольфрамовый нагреватель		Генератор в. ч А624.25, 25 кВт	Генератор в. ч ИО60.083, 25 кВт
Габаритные размеры, мм:					
длина	1450	1530	1655	2570	1550
ширина	1000	1440	1466	1500	1000
высота	2470	2010	2050	2100	2110
Масса (без генератора), т	0,8	2,0	1,5	3,0	1,45

ПАЙКА ПОГРУЖЕНИЕМ

Пайка погружением осуществляется путем нагрева изделий в ваннах с расплавами солей или припоев.

ПЕЧИ-ВАННЫ ДЛЯ ПАЙКИ ПОГРУЖЕНИЕМ
В РАСПЛАВЫ СОЛЕЙ

Нагрев изделий в соляных ваннах может быть прямой или косвенный. Косвенный нагрев производят в вакууме или в контролируемой атмосфере в погружаемых в расплавы солей специальных контейнерах. Печи-ванны по конструктивному оформлению подразделяют на тигельные, электродные однофазные с циркуляцией соли, прямоугольные электродные и электродные трехфазные. Технические характеристики некоторых печей-ванн для высокотемпературной пайки приведены в табл. 23 [18].

Конструктивное оформление тигельной соляной ванны, работающей при температурах до 850°C , показано на рис. 40. Ванна состоит из металлического несущего корпуса, в котором размещены теплоизоляция 1, огнеупорная кладка 2 с отверстиями для термопары 3 и выводов 4 от нагревателя 5. В нагревательное устройство помещен тигель 6 с крышкой 7. Для измерения температуры расплава соли предусмотрена

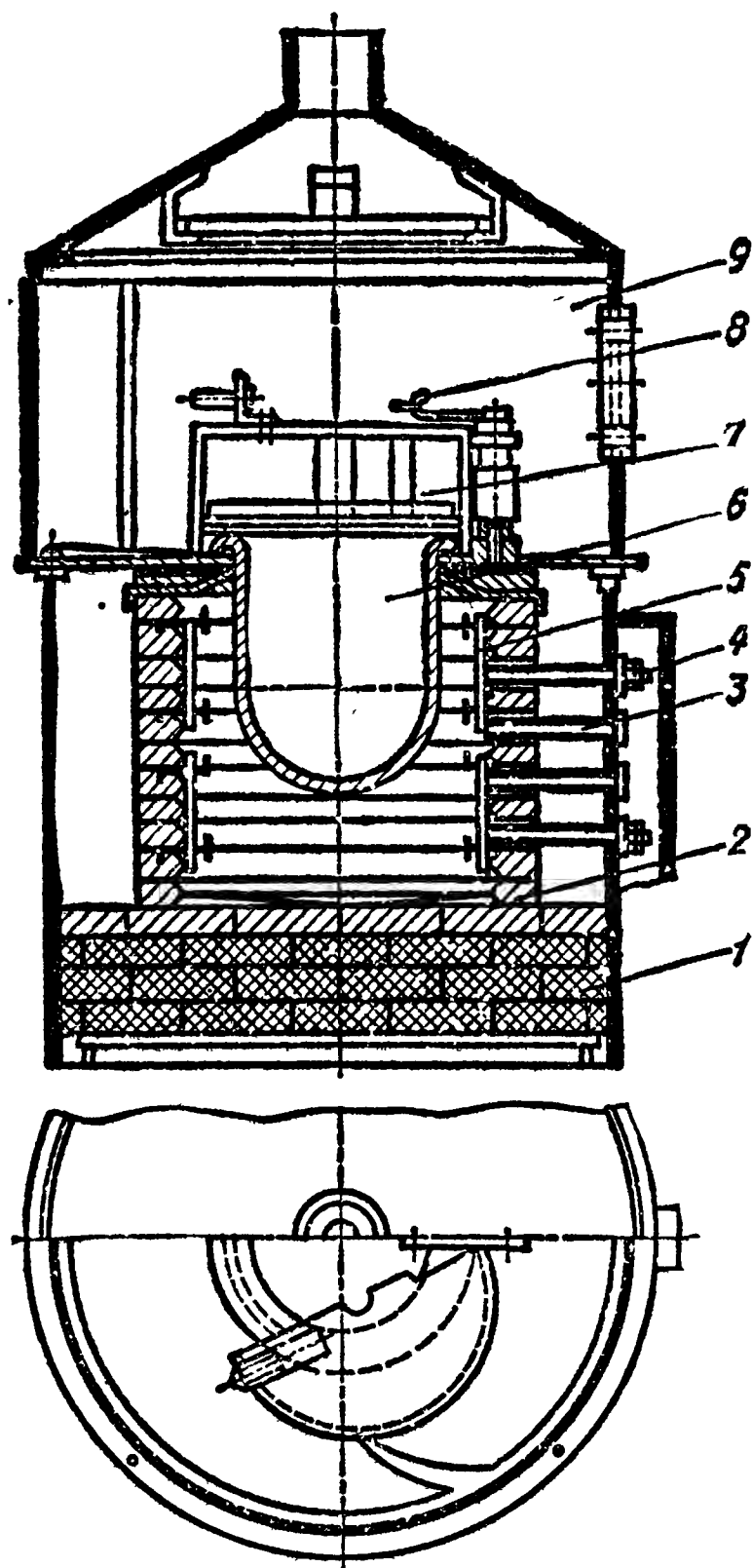


Рис. 40. Соляные ванны В-10, В-20, В-30

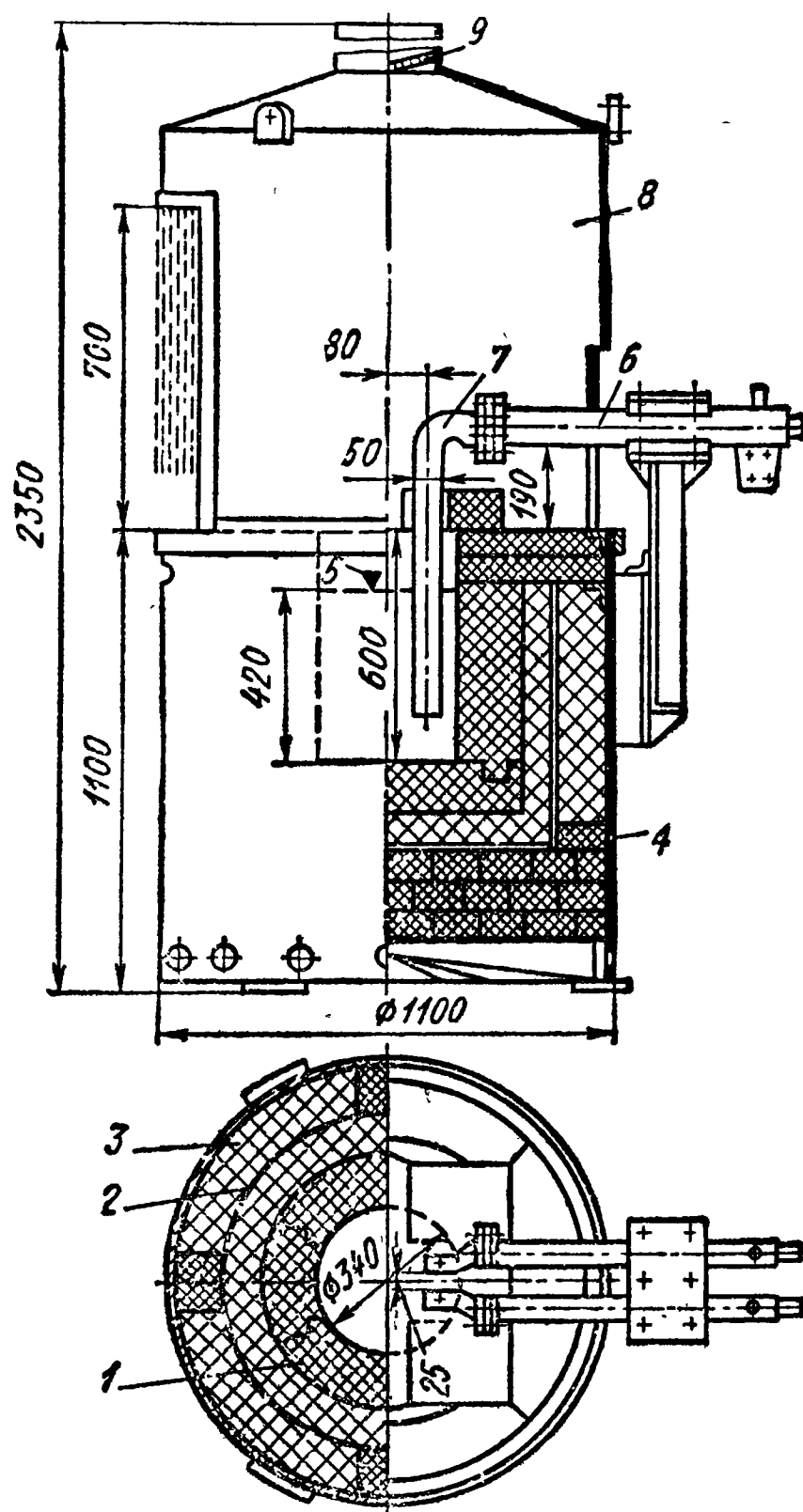


Рис. 41. Соляная печь-ванна С-45:

1 — огнеупорная кладка; 2 — промежуточный кожух; 3 — теплоизоляция; 4 — кожух; 5 — уровень соли; 6 — электрододержатель с водяным охлаждением; 7 — сменная часть электрода; 8 — вытяжной колпак; 9 — шибер

коленчатая термопара 8. Удаление испарений, выделяющихся в процессе нагрева изделий, производится через вытяжной зонт 9.

Для пайки изделий при температурах до 1300°C применяют электродные однофазные печи-ванны с принудительной циркуляцией соли. Конструкция соляной печи-ванны С-45 показана на рис. 41. Вследствие высокой температуры эксплуатации нагрев ванны осуществляют с помощью электродов, погруженных в солевой расплав. Электрододержатели охлаждают водой, поступающей через специальные карманы.

В случае пайки крупногабаритных изделий используют прямоугольные электродные печи-ванны С-50, С-100, СКБ-5152 и др.

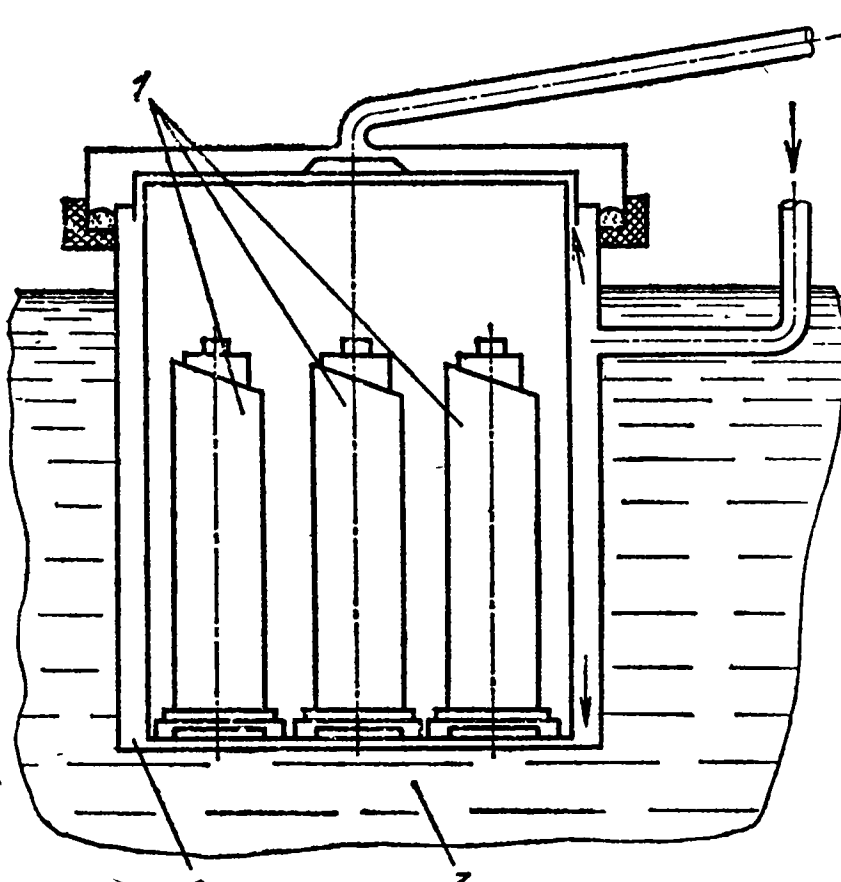
Ниже приведена техническая характеристика печи-ванны СВС-100/13 (исполнение М-01), предназначенной для пайки при температуре $850-1300^{\circ}\text{C}$.

23. Печи-ванны для высокотемпературной пайки

Параметры	Тигельные			Соляные электродные однофазные с циркуляцией соли		
	В-10	В-20	В-30	С-20	С-25	С-45
Номинальная мощность, кВт . .	10	20	30	20	25	45
Напряжение сети, В	220	220	220/380	380/220	380/220	380/220
Максимальная рабочая температура, °С	850	850	850	1300	850	1300
Диаметр тигля (ванны), мм . . .	200	300	400	220	380	340
Глубина тигля (ванны), мм . . .	350	535	555	460	475	600
Производительность, кг/ч . . .	30	80	130	90	90	200
Размеры в плане, мм	1170×1080	1380×1290	1450×1310	Φ1100	Φ1100	Φ1100
Масса с футеровкой, т	1,0	1,4	1,8	1,7	1,25	2,4

Параметры	Соляные прямоугольные электродные		Соляные электродные трехфазные		
	С-50	С-100	С-35	С-75	СКБ-5152
Номинальная мощность, кВт . .	50	100	35	75	120
Напряжение сети, В	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220
Максимальная рабочая температура, °С	600	850	1300	1300	1300
Диаметр тигля (ванны), мм . . .	600×900	600×900	220	340	950×250
Глубина тигля (ванны), мм . . .	450	450	420	580	475
Производительность, кг/ч . . .	100	160	30	55	140
Размеры в плане, мм	2016×1750	2200×2080	Φ900	Φ1100	1912×1794
Масса с футеровкой, т	2,6	3,2	0,85	1,55	3,65

Процесс пайки с косвенным нагревом схематично показан на рис. 42. Детали 1 помещают в герметичный контейнер 2, в котором создается вакуум или контролируемая атмосфера. Контейнер погружают в расплав соли 3, нагретой до температуры несколько выше, чем температура плавления припоя.



Техническая характеристика печи-ванны СВС-100/13 (исполнение М-01)

Установленная мощность, кВт	100
Максимальная рабочая температура, °С	1300
Мощность холостого хода, кВт	61,1
Производительность, кгс/ч . . .	320
Понижающий трансформатор . .	ТНТ-100.АО
Напряжение питающей сети, В	380
Напряжение на электродах, В:	
пусковое	15,3; 18,3
рабочее	10,3; 11,6; 13,2
холостого хода	6,47; 8,25
Число фаз	3
Число электродных групп . . .	1
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг	0,241
Объем расплавленной соли, л	91
Расход охлаждающей воды, м³/ч	1
Размеры рабочего пространства, мм:	
длина	350
ширина	200
высота	320
Габаритные размеры, мм:	
длина	1905
ширина	1715
высота	3090
Масса (без соли), т	3,05

Рис. 42. Схема процесса пайки изделий погружением с косвенным нагревом

В качестве нагревающей среды при пайке в соляных ваннах при прямом и косвенном нагреве используют хлориды щелочных и щелочноземельных металлов. Составы некоторых соляных смесей приведены в табл. 24.

24. Составы смесей солей, применяемых в соляных ваннах, %

Компоненты, %								Рабочая температура, °C
NaCl	BaCl ₂	CaCl ₂	KCl	Na ₂ CO ₃	K ₂ CO ₃	Na ₂ B ₄ O ₇	SrO ₂	
—	100,0	—	—	—	—	—	—	962—1300
22,5	77,5	—	—	—	—	—	—	665—1300
30,0	70,0	—	—	—	—	—	—	710—1300
—	85,0	—	—	—	—	—	15,0	1130
—	—	—	50,0	50,0	—	—	—	670—1000
—	—	—	—	50,0	50,0	—	—	930—950
40,0	50,0	—	—	—	—	10,0	—	930—950
22,0	30,0	48,0	—	—	—	—	—	485—900
30,0	65,0	—	5,0	—	—	—	—	570—900
33,0	—	67,0	—	—	—	—	—	570—900
22,0	48,0	—	30,0	—	—	—	—	605—900
—	50,0	50,0	—	—	—	—	—	655—900

При пайке алюминия или разнородных металлов применяют смеси солей, обладающие флюсующими свойствами.

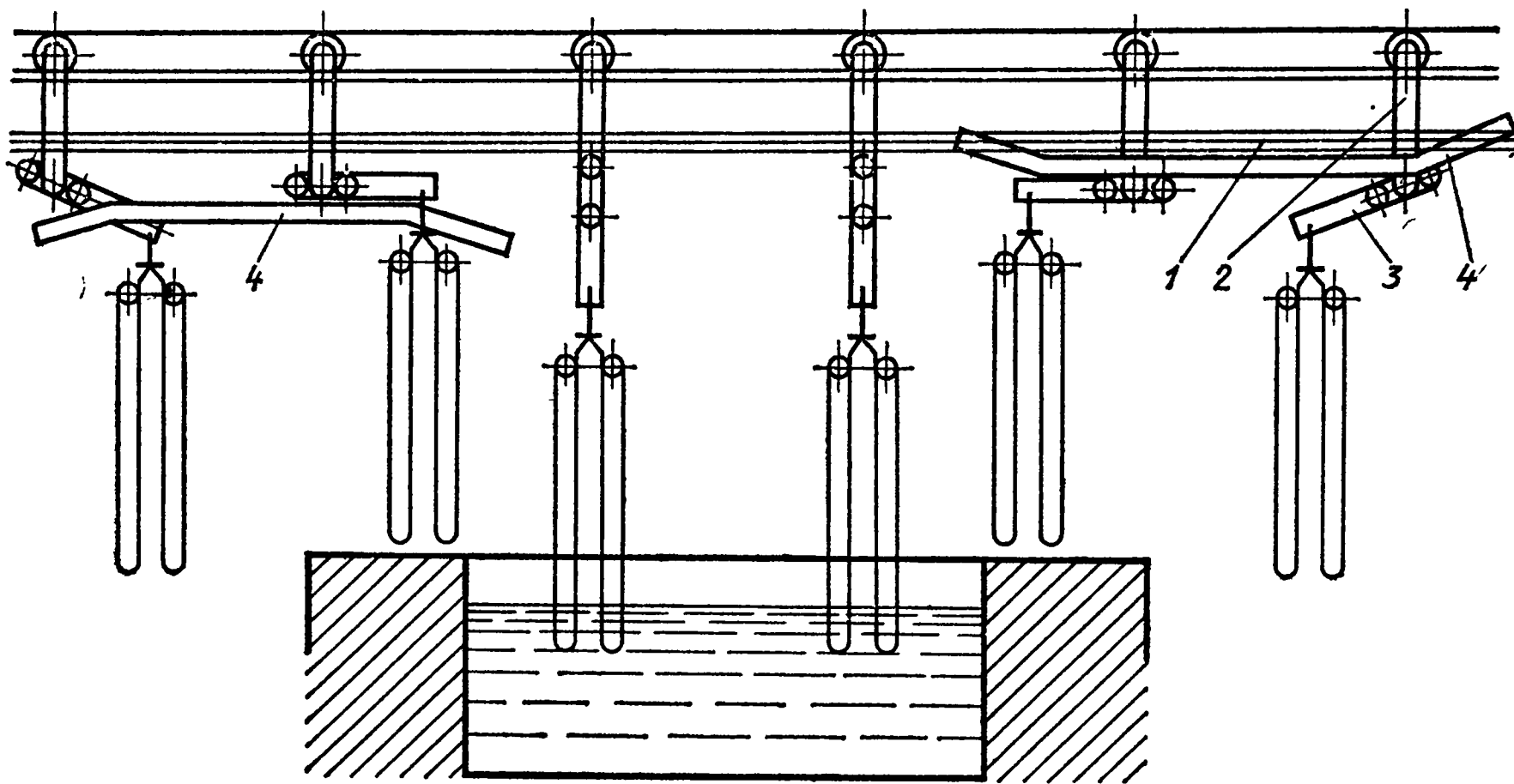


Рис. 43. Схема конвейерной пайки рам велосипедов погружением в соляную ванну

Схема конвейерной пайки рам велосипедов в соляной ванне показана на рис. 43. По монорельсу 1 на подвесках 2 и 3 закреплены паяемые узлы. Автоматическое погружение и выгрузка узлов осуществляется с помощью копиров 4. Продолжительность выдержки паяемых рам в расплаве соли регулируется путем изменения скорости движения конвейера.

УСТАНОВКИ ДЛЯ ПАЙКИ ПОГРУЖЕНИЕМ
В РАСПЛАВЫ ПРИПОЕВ

Пайка погружением в расплавы припоев имеет две разновидности: погружением в расплавленный припой и волной припоя (рис. 44).
Установки для пайки погружением состоят из последовательно расположенных ванн для флюсования и пайки.
Пайка погружением основана на заполнении зазоров припоем за счет капиллярного давления при контактировании поверхностей собранных узлов с расплавом припоя [3,12].

При пайке волной расплавленного припоя, создаваемой насосами либо магнитными нагнетателями, изделия перемещаются конвейером.

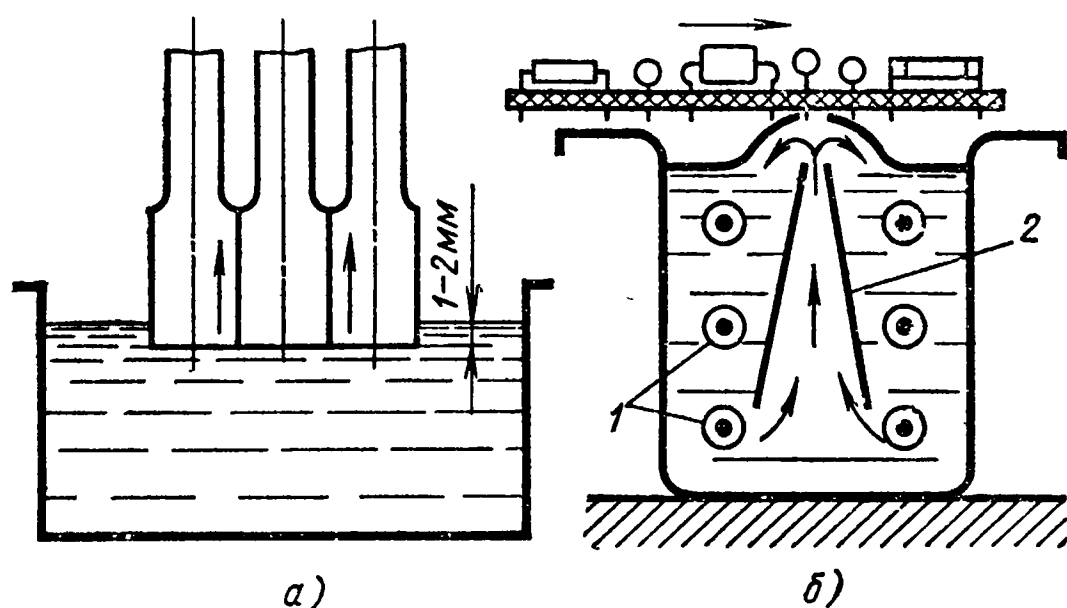


Рис. 44. Схема пайки погружением в расплавленный припой (а) и волной припоя (б):

1 — электронагревательные элементы; 2 — сопло

В ряде случаев применяют установки для пайки струями расплавленного припоя. Струйный метод подачи припоя осуществляют специальными устройствами одновременно во все зоны, подвергаемые пайке.

Процессы пайки погружением легко поддаются автоматизации.

ПАЙКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Способ основан на применении безынерционных источников нагрева: кварцевых ламп, электронного луча и лазера, отличается быстротой нагрева изделий, возможностью точного регулирования процесса.

УСТАНОВКИ С КВАРЦЕВЫМИ ЛАМПАМИ

Кварцевые лампы применяют для пайки изделий из тонкостенных деталей сравнительно простой формы. В зависимости от конфигурации и конструкции паяемого изделия рефлекторы с кварцевыми лампами устанавливают с одной или нескольких сторон. Схема установки двустороннего нагрева для пайки трехслойной панели с сотовым наполнителем показана на рис. 45. Установки с кварцевыми лампами могут быть с нагревом в вакууме, в контролируемой атмосфере и в воздушной среде. В последнем случае установки используют только для соединения деталей низкотемпературными припоями из-за ограниченной стойкости кварцевого стекла при нагреве до высоких температур на воздухе.

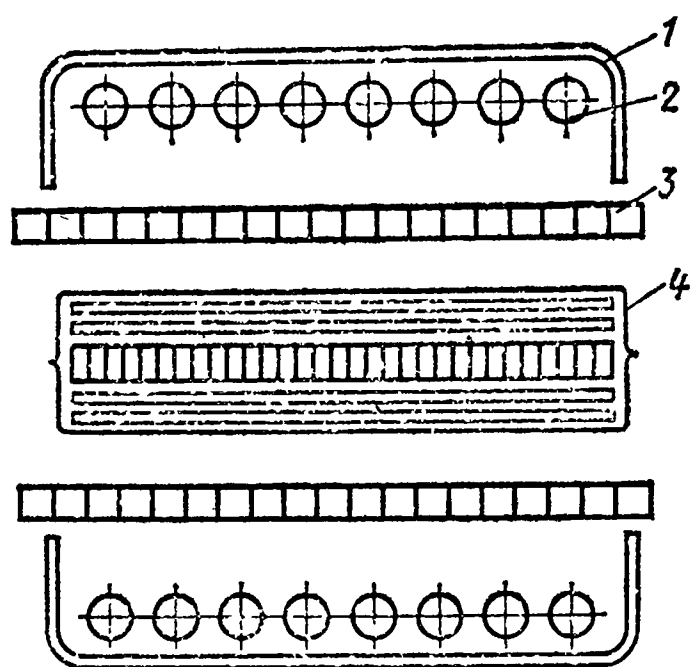


Рис. 45. Схема двустороннего нагрева при пайке трехслойной панели с сотовым наполнителем:

1 — рефлектор; 2 — кварцевая лампа; 3 — опорная решетка; 4 — изделие

В зависимости от конструкций установок применяют кварцевые йодные лампы накаливания в различном исполнении. Наиболее часто используют прямые лампы инфракрасного нагрева для работы в горизонтальном положении. Кварцевая трубчатая лампа накаливания типа НИК-220-1000 Тр, предназначенная для создания интенсивного инфракрасного нагрева, показана на рис. 46. Номинальное напряжение сети при эксплуатации 220 В. В ряде случаев допускается эксплуатация ламп при напряжении до 450 В.

Инерционность лампы (время с момента включения до достижения номинального значения энергетического потока) составляет 0,6 с. Лампы наполнены аргоном под давлением 600 мм рт. ст. и йодом в количестве 1—2 мг. Наличие паров йода обеспе-

чивает стабильность энергетического и светового потока (сохранение 95—98% начального потока в конце срока службы).

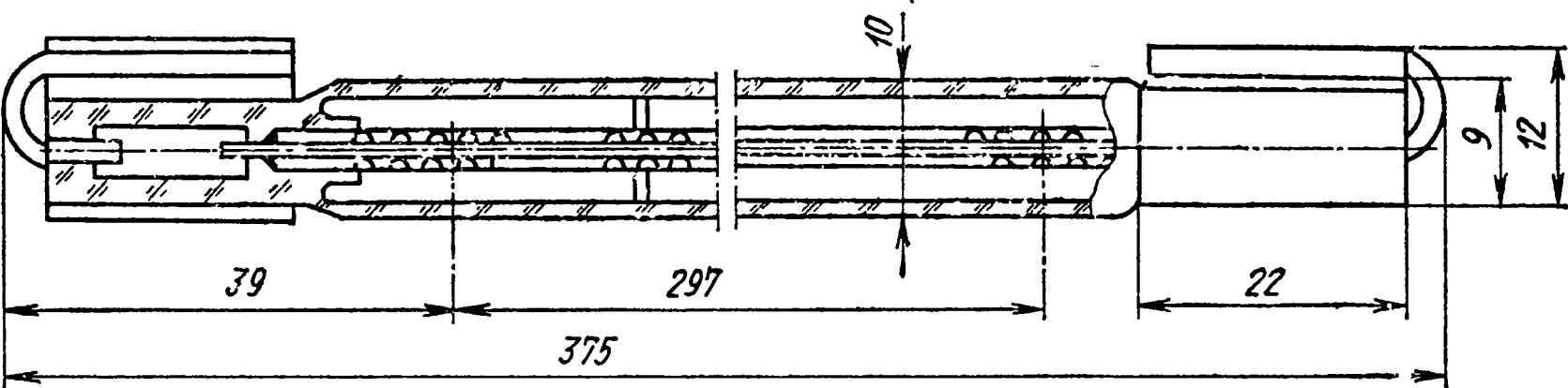


Рис. 46. Лампа накаливания кварцевая трубчатая НИК-220-1000 Тр

При длительной эксплуатации кварцевые лампы типа НИК-220-1000 Тр должны находиться в горизонтальном положении. Отклонение от горизонтали не должно превышать 5°. Температура вводов в процессе работы не должна превышать 350° С.

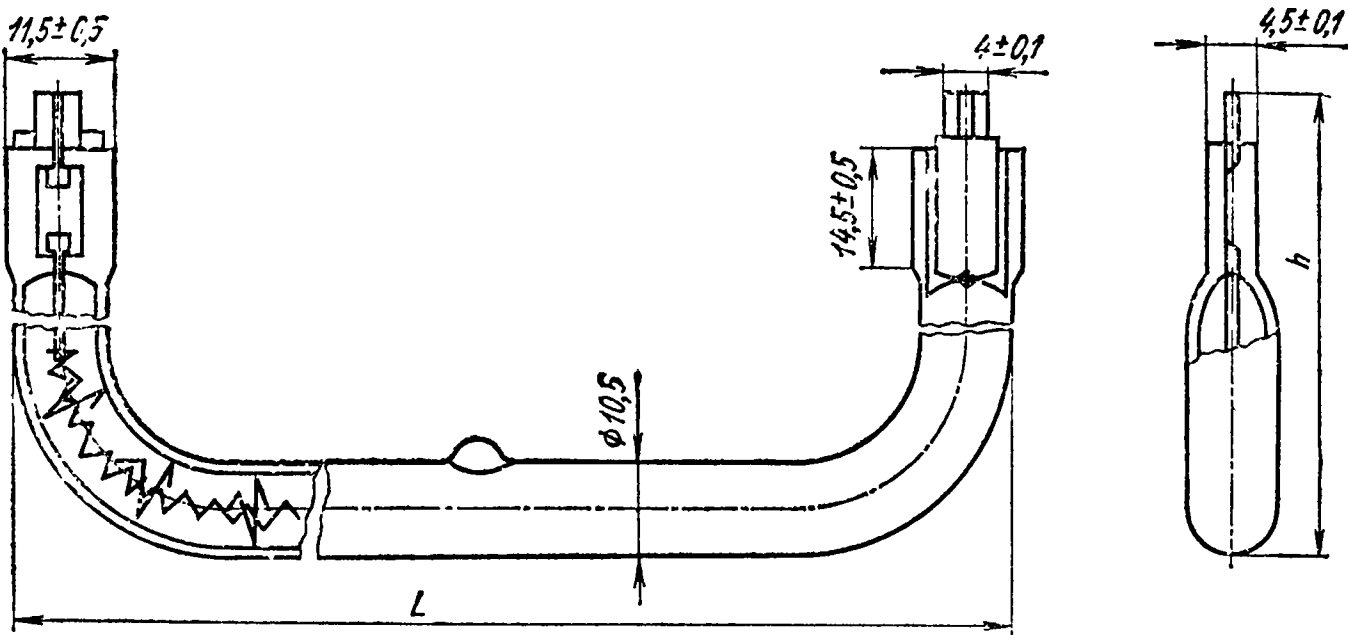


Рис. 47. Лампа накаливания кварцевая с отогнутыми концами КИО-220-2500

Основные параметры лампы НИК-220-1000 Тр приведены в табл. 25. Кроме аргоно-йодных ламп применяют лампы с ксеноно-йодным наполнением (табл. 26). Для создания потока с высокой удельной плотностью излучения применяют кварцевые йодные лампы накаливания с отогнутыми концами типа КИО-220-2500 (рис. 47).

25. Кварцевые лампы НИК-220-1000 Тр

Параметры	Напряжение, В		
	220	350	450
Потребная мощность, Вт	1040	2 200	3 300
Температура, °С	2280	2 880	2 930
Энергетический поток, Вт	780	1 650	2 500
Начальный световой поток, лм	8000	48 000	100 000
Световая отдача, лм/Вт	8	22	31
Средний срок службы, ч	5000	750	80

26. Кварцевые лампы с ксеноно-йодным наполнением

Параметры	КИ 85-1000	КИ 200-1200	КИ 220-1300
Напряжение, В	85	200	220
Потребная мощность, Вт	1 000	1 200	1 300
Температура, °С	—	—	2 430
Световой поток, лм	28 000	33 600	17 500
Световая отдача, лм/Вт	28	28	—
Габаритные размеры, мм:			
диаметр цоколя	12	12	11,5
диаметр колбы-трубки	11	11	10
длина общая	175	175	305

Плотность излучения в лампах повышена в результате выноса цоколей за зону рабочего действия инфракрасного потока.

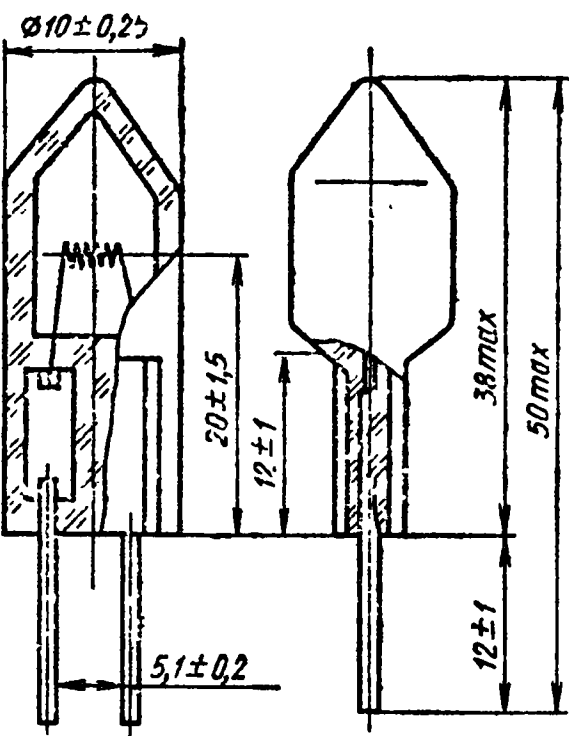


Рис. 48. Лампа накаливания кварцевая малогабаритная КИМ 10-90

Краткие технические характеристики ламп с отогнутыми концами приведены в табл. 27.

27. Кварцевые йодные лампы с отогнутыми концами

Параметры	КИО 220-2500	КИО 220-2500-2	КИО 220-2500-3
Напряжение, В	220 (380)		
Потребная мощность, кВт	2,5 (6)		
Температура, °С	2330 (2930)		
Продолжительность горения, ч	2000 (50)		
Габаритные размеры, мм	500×140	470×125	440×110
Масса, г	63	56	52

Примечание. Цифры в скобках относятся к напряжению 380 В.

Для пайки изделий с локальным нагревом используют малогабаритные лампы с йодным циклом (рис. 48, табл. 28). Преимуществом малогабаритных ламп является возможность их размещения в установках для пайки в любом пространственном положении.

28. Малогабаритные кварцевые лампы

Параметры	КИМ 6-25-25	КИМ 9-75	КИМ 10-90
Номинальное напряжение, В	6	9	10
Потребная мощность, Вт	25	75	90
Световая отдача, лм/Вт	13	21	22
Сила света в направлении, перпендикулярном к плоскости тела накала, св	—	160	185
Размеры тела накаливания, мм	2,7×1	2,6×2,6×1,2	3,5×1,9
Срок службы, ч	200	50	50
Габаритные размеры, мм:			
диаметр	10	10	10
высота колбы	28	38	38
общая длина	36	50	50
Масса, г	3,5	3,5	3,5

Примечания: 1. Наполнение ламп ксеноном 650 мм рт. ст., йодом 0,1—0,12 мг.
2. Максимально допустимая температура на вводах 350°С.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ УСТАНОВКИ

Установки этого вида применяют для пайки высокоточных изделий, собранных из тонкостенных и разнотолщинных элементов. Пайку электронным лучом успешно применяют в производстве изделий, изготовленных из активных и тугоплавких металлов.

Нагрев электронным лучом позволяет предельно сократить продолжительность взаимодействия расплавленного припоя с паяемым металлом и тем самым сохранить его свойства.

Для пайки изделий используют местный нагрев с фокусированным лучом и общий — сканирующим потоком электронов.

Для пайки изделий с местным нагревом применяют установки типа ЭЛУ-4 с пушкой ЭЦ-60/10. Для исключения перегрева и оплавления кромок изделия, а также обеспечения равномерного прогрева зоны пайки электронный пучок колеблется в результате подачи на отклоняющую систему пушки импульсов синусоидальной или пилообразной формы от генератора НГПК-3М.

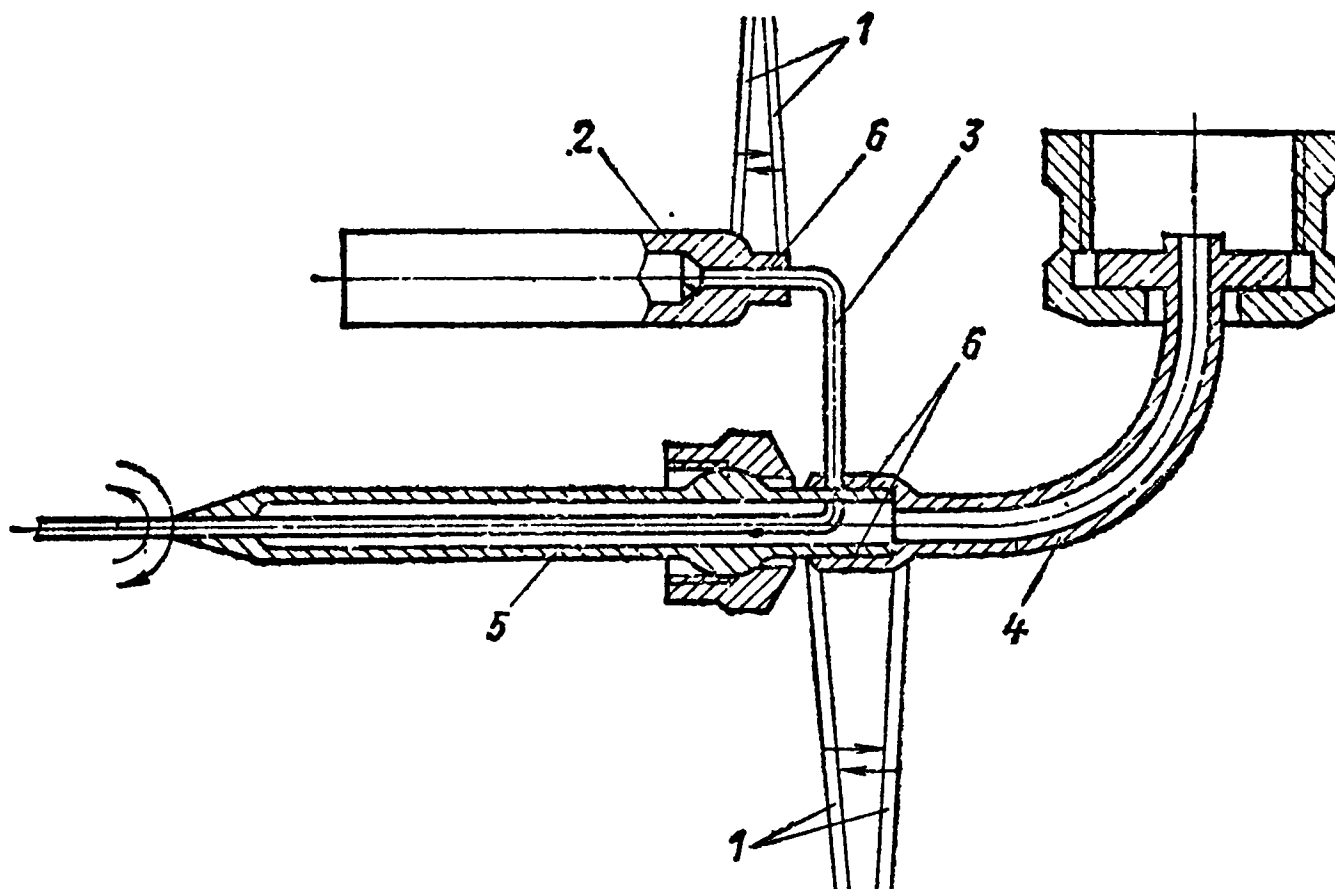


Рис. 49. Схема пайки узла медицинского инструмента:

1 — колеблющийся электронный пучок; 2 — цилиндр; 3 — игла;
4 — патрубок; 5 — рабочий цилиндр; 6 — припой

Изделия для пайки на электронно-лучевой установке собирают в специальном сборочном приспособлении, которое позволяет производить пайку последовательно нескольких узлов за одну откачку камеры.

Приспособление устанавливают на манипулятор электронно-лучевой установки. Для равномерного прогрева места пайки узел манипулятора имеет колебательные движения вокруг оси детали. Схематично процесс пайки узла медицинского инструмента из стали 12Х18Н10Т показан на рис. 49 [34].

Установки для электронно-лучевой пайки отличаются от обычных сварочных установок модернизацией — электронно-лучевую пушку снабжают отклоняющей системой, которая и составляет электронно-лучевой сканирующий нагреватель. Кроме того, рабочую камеру установки оснащают тепловым охлаждаемым экраном. Для предотвращения напыления смотровых стекол компонентами припоев и защиты от теплового излучения их закрывают сменными экранными стеклами. Защиту откачной системы от теплового воздействия осуществляют системой экранов.

ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ

Пайку лазером применяют для соединения тончайших деталей с более массивными элементами конструкции, а также для изделий, материалы которых чувствительны к тепловому воздействию.

Лазерная установка СУ-1 представляет собой комплекс оптико-механических и электрических приборов, основным звеном которого является оптический квантовый генератор на кристалле рубина с примесью 0,05% хрома.

Действие генератора основано на явлении индуцированного (упорядоченного) испускания световой энергии возбужденными атомами хрома из кристалла рубина под действием облучения импульсной лампы ИПФ-800.

Для повышения индуцированного излучения используется эффект многократного прохождения излучения через кристалл рубина за счет отражения от зеркальных поверхностей резонатора (полупрозрачные и непрозрачные диэлектрические покрытия на торцах кристалла рубина).

Для создания необходимой плотности энергии индуцированного излучения световой луч фокусируется через систему линз в узкий пучок, который и создает необходимую температуру в зоне пайки.

В зависимости от конструктивных особенностей и массы паяемых изделий, а также свойств соединяемых материалов используют лазерные установки различной мощности. Основные технические характеристики лазерных установок, применяемых в различных отраслях техники, приведены в табл. 29.

29. Лазерные установки для пайки

Параметры	СУ-1	К-3М	УЛ-2М	Луч 1 М	УЛ-20
Максимальная потребная мощность, кВт	1,2	1,0 *	2,5	3	5
Полная излучаемая энергия при снятом объективе, не менее, дж	0,7	1,5	8	2	20
Длительность импульса, мс	5	—	1; 3; 6; 8	—	1; 3; 6; 8
Источник оптической накачки — импульсная лампа	ИФП-800	ИФП-800	ИФП-1200	ИСПТ-6000	ИФП-2000 (4 шт.)
Осветитель подсвета кристалла и микроскопа — лампа накаливания . .	СЦ-61, 8 В, 20 Вт	6,3 В	СЦ-61, 8 В, 20 Вт	СЦ-61, 8 В, 20 Вт	СЦ-61, 8 В, 20 Вт
Оптический активный материал — кристалл . . .	СР $D = 6,5, L = 80$	СР $D = 6,5, L = 80$	СР $D = 7, L = 120$	СР $D = 7, L = 120$	СР $D = 11,5, L = 120$
Габаритные размеры, мм					
ширина	—	1000	850	1305	850
длина	—	800	1000	1200	1600
высота	—	1800	1200	1550	1850
Масса, кг	—	600	—	350	1000

* кВА.

Примечания: 1. Напряжение питания 220, допускаемое отклонение 10%, частота 50 Гц.

2. Оптически активный материал обозначен СР — синтетический рубин; Ст — стекло; D — диаметр, мм; L — длина, мм.

ПАЙКА ГОРЕЛКАМИ

Пайку горелками широко применяют в промышленности вследствие незначительной стоимости и простоты оборудования, автономности и возможности нагрева независимо от формы и размеров изделий.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗОПЛАМЕННОЙ ПАЙКИ

Ацетиленовые генераторы. По ГОСТ 5190—67 генераторы подразделяют по предельному давлению вырабатываемого ацетилена на три группы — низкого (1,1 кгс/см²), среднего (1,1—2,5 кгс/см²) и высокого (> 2,5 кгс/см²) давления.

По роду установки генераторы разделяют на стационарные и передвижные. Генераторы производительностью до 3,2 м³/ч изготовляют передвижными, свыше 3,2 м³/ч — стационарными.

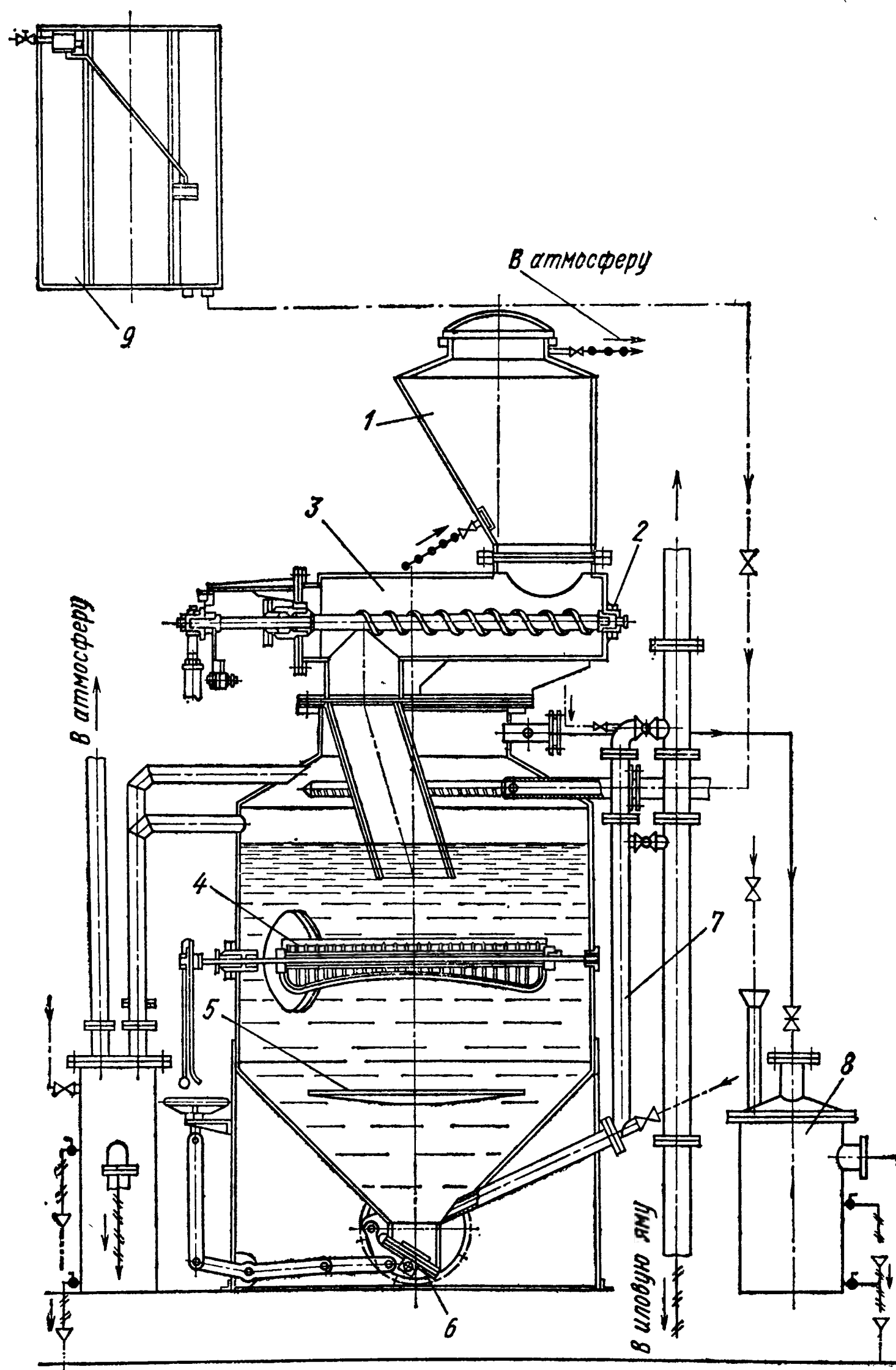


Рис. 50. Стационарный ацетиленовый генератор ГНД-35:

1 — бункер; 2 — шнек; 3 — желоб; 4 — решетчатая корзина; 5 — решетка;
6 — илоспускной клапан; 7 — труба для спуска жидкого ила; 8 — промыватель; 9 — напорный водяной бак

Стационарный ацетиленовый генератор ГНД-35 низкого давления предназначен для непрерывного получения газообразного ацетилена (рис. 50), он работает по системе «карбид в воду».

Генератор среднего давления типа ГВР, работающий по комбинированной системе «контактная» (вариант «вытеснения воды») и «вода на карбид», показан на рис. 51. Генераторы рассчитаны на давление в сети 1,08—1,3 кгс/см² при наибольшем давлении в корпусе 1,7 кгс/см².

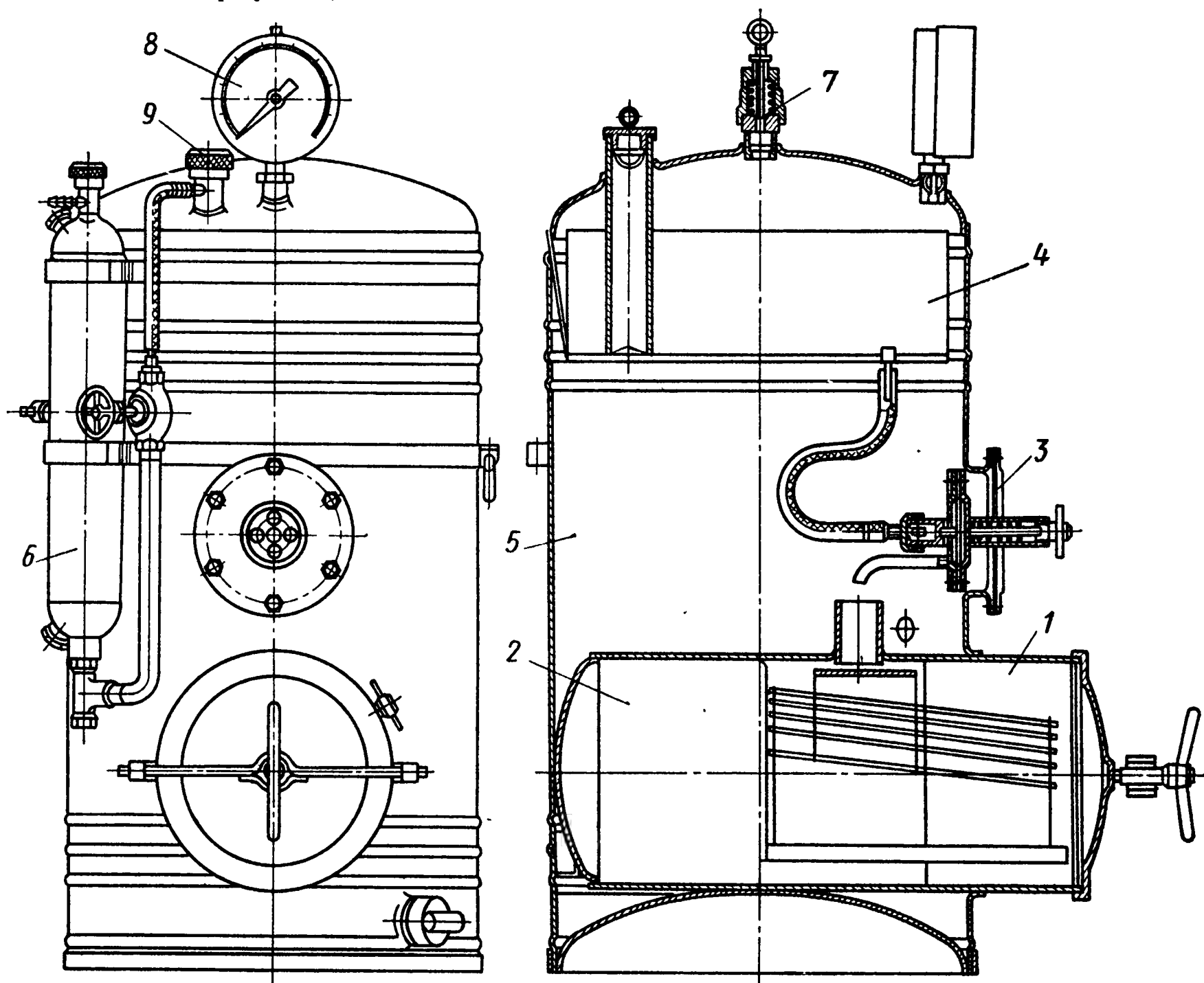


Рис. 51. Генератор ГВР-1,25:

1 — реторта; 2 — вытеснительная камера; 3 — регулятор подачи воды; 4 — водяной бак; 5 — газосборник; 6 — водяной затвор; 7 — предохранительный клапан; 8 — манометр; 9 — разрывная мембрана

Генератор АНВ-1,25 (рис. 52) — аппарат открытого типа, низкого давления, прерывного действия. В нем также сочетаются две системы: «контактная» (вариант «вытеснения воды») и «вода на карбид». Эксплуатационно-технические характеристики некоторых ацетиленовых генераторов приведены в табл. 30.

Для пайки изделий используют также ацетилен, поставляемый в стальных баллонах.

Основные характеристики горючих газов, применяемых при газопламенной пайке, приведены в табл. 31.

Баллоны предназначены для хранения и транспортировки газов в сжатом, сжиженном или растворенном состоянии. Их изготавливают обычно из бесшовных труб емкостью 0,4—55 л. Наиболее распространены баллоны емкостью 40-л, рассчитанные на избыточное рабочее давление до 200 кгс/см². Такой баллон имеет наружный диаметр 219 мм, высоту около 1500 мм и массу около 60 кг.

Для хранения и транспортировки пропана, бутана, растворенного аммиака и других сжиженных газов при рабочем давлении в баллонах не выше 30 кгс/см² можно применять сварные баллоны.

30. Ацетиленовые генераторы

Параметры	АССЗ-55	ГНД-35	АСР-1-56	ГРК-10-57	ГВР-3	МГ-54	АСМ-1-58	Параметры	АССЗ-55	ГНД-35	АСР-1-56	ГРК-10-57	ГВР-3	МГ-54	АСМ-1-58
Производительность, м³/ч	80	35	20	10	3	2	1,25	Габаритные размеры, мм:	4200	3800	1430	2100	1260	1170	795
Наибольшее давление в корпусе, кгс/см²	2,5	1,05	2,5	2,5	1,7	1,1	2,5	высота	3370	—	—	1050	1400	—	—
Рабочее давление на выходе из водяного затвора, кгс/см² . .	1,6—1,7	1,025	1,5—1,8	≤ 1,7	1,15—1,3	1,03	1,1—1,3	длина	—	—	—	2700	1320	—	—
Применяемая грануляция карбида, мм	Любая	8/15—25/80	15/25 и 25/80	25/80	25/80	15/25 и 25/80	25/80	ширина	—	—	—	—	630	590	295
Единовременная загрузка карбида, кг	450	160—200	80	20—25	8	5	2,2	диаметр	—	—	1860	—	—	220	37
								Масса, кг: без загрузки в заряженном состоянии . .	—	—	—	—	—	—	—

31. Горючие газы

Наименование	Плотность, кг/м³	Теплотворная способность, ккал/м³	Температура, °С		Необходимое количество кислорода, м³ на 1 м³ горючего газа	Пределы взрывоопасности горючего газа в смеси, %		Способы хранения и транспортировки
			пламени	воспламенения		с воздухом	с кислородом	
Ацетилен	1,179	11 500	3150	428	2,5	2,2—81,0	2,8—93,0	В стальных баллонах в растворенном состоянии под давлением 17—21 кгс/см²
Метан	0,715	8 530	2000	340	2,0	4,8—16,7	5,4—59,2	В стальных баллонах под давлением 151 кгс/см²
Этан	1,36	14 000	2050	—	3,5	3,1—15,0	4,1—50,5	
Пропан	2,0	20 600	2050	—	5,0	2,2—9,5	—	По трубопроводу или в стальных баллонах В стальных баллонах под давлением 151 кгс/см²
Бутан	2,7	27 500	2050	—	6,5	1,5—8,4	—	
Водород	0,0898	2 570	2100	410	0,5	3,3—81,5	2,6—93,9	Бензин хранится в бочках и цистернах
Природный газ	0,7	—	2000—2100	—	2,0	3,8—24,8	10,0—73,6	
Нефтяной газ	0,776—1,357	10 500—11 000	2300—2400	—	3,5	—	—	
Пары бензина	0,69—0,76 *1	30 000	2400	—	1,3—1,7 *2	2,6—6,7	—	
Пары керосина	—	—	2300	—	—	1,4—5,5	—	

*1 В кг/л.
*2 В г/л.

Баллоны изготавливают по ГОСТ 949—73.

Баллонные вентили служат для создания герметичного соединения баллона с редуктором или рампой. Типовая конструкция запорного вентиля кислородных баллонов показана на рис. 53.

Герметичность вентиля в месте прохода шпинделя 1 через сальниковую гайку 2 обеспечивается за счет прижатия седла шпинделя к фибровой прокладке 3 усилием пружины 4 и давлением газа изнутри. Вследствие этой особенности конструкции при понижении давления в баллоне иногда имеют место пропуски газа в сальнике. Вывернув клапан до отказа, можно увеличить уси-

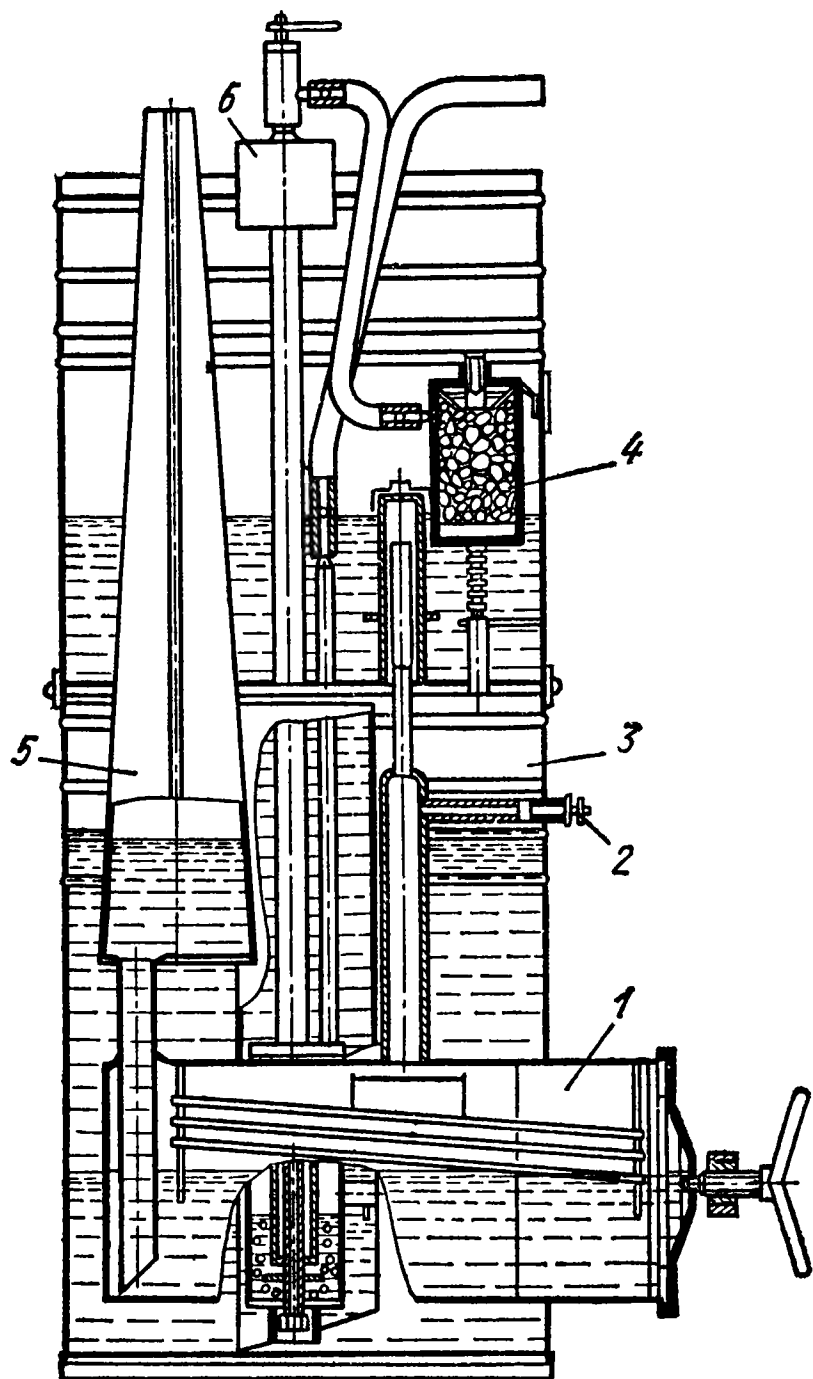


Рис. 52. Генератор АНВ-1,25:

1 — реторта; 2 — кран-регулятор подачи воды; 3 — газосборник; 4 — карбидный осушитель; 5 — вытеснительная трубка; 6 — водяной затвор

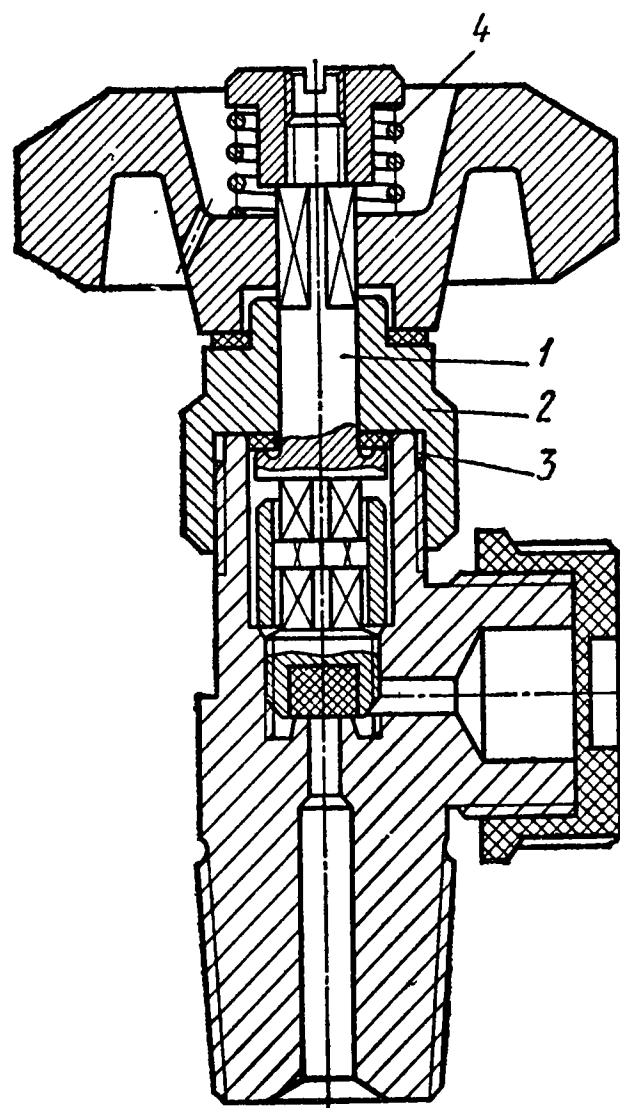


Рис. 53. Вентиль кислородного баллона

лие прижатия седла к прокладке, однако это увеличивает ее износ и не позволяет быстро перекрывать клапан вентиля.

Разрез типового вентиля ацетиленового баллона показан на рис. 54. Все детали вентиля изготавливают из стали, кроме уплотнителя 1, который обычно делают из эбонита, и сальниковых прокладок 2, изготавливаемых из сыромятной кожи, пропитанной солидолом или минеральным маслом. В хвостовике вентиля в канале для прохода газа между стальными сетками 3 расположен фильтр 4 из нескольких войлочных прокладок, его назначение — защита внутренней полости вентиля и присоединяемого к нему редуктора от попадания частиц пористой массы, которой заполнен ацетиленовый баллон.

На боковой грани вентиля имеется кольцевая выточка, в которую вставляют кожаную прокладку 5. К ней прижимается специальным хомутом входной штуцер ацетиленового редуктора или ниппель трубки наполнительной или перепускной рампы. Каждый вентиль баллона (кроме вентилях, не имеющих присоединительной резьбы) снабжен заглушкой, закрывающей отверстие присоединительного штуцера и предохраняющей его от засорения, а резьбу штуцера — от повреждений.

Рампы предназначены для перепуска при централизованной подаче газов к рабочим постам газопламенной пайки. Перепускные рамповые установки размещают в отдельном помещении. Кислородная рампа состоит из медного коллектора с запорными вентилями, к которым при помощи гибких медных трубок (змеевиков), имеющих на концах ниппели и накидные гайки, присоединяют кислородные баллоны.

Из рампы в трубопровод ацетилен подается под давлением, не превышающим $1,5 \text{ кгс/м}^2$; отбор из трубопровода производится через предохранительные затворы, предохраняющие трубопровод от попадания в него взрывной волны и пламени со стороны потребления, а также от проникновения в него воздуха и кислорода.

Шланги (гибкие резинотканевые рукава) предназначены для присоединения горелок к баллонам, генераторам или газопроводам, обеспечивают возможность свободного перемещения паяльщика и аппаратуры в пределах длины шланга.

Шланги для горючих газов и кислорода, выпускаемые по ГОСТ

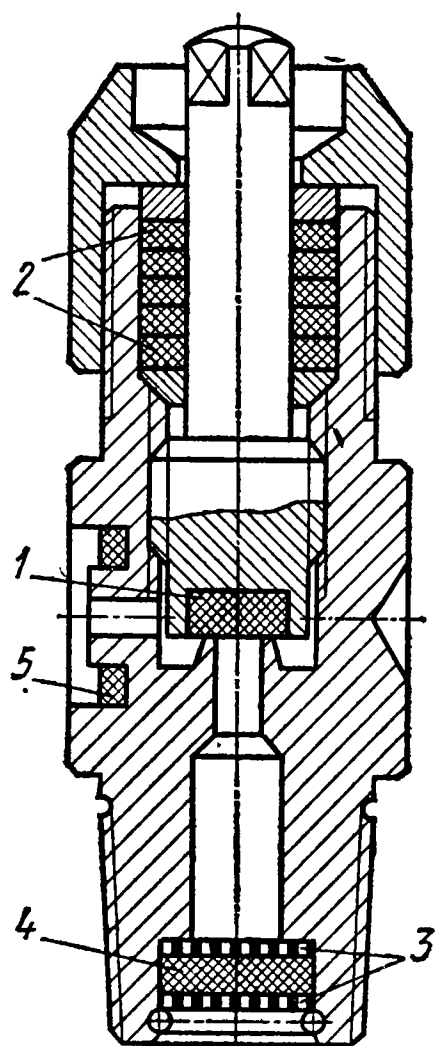


Рис. 54. Вентиль ацетиленового баллона

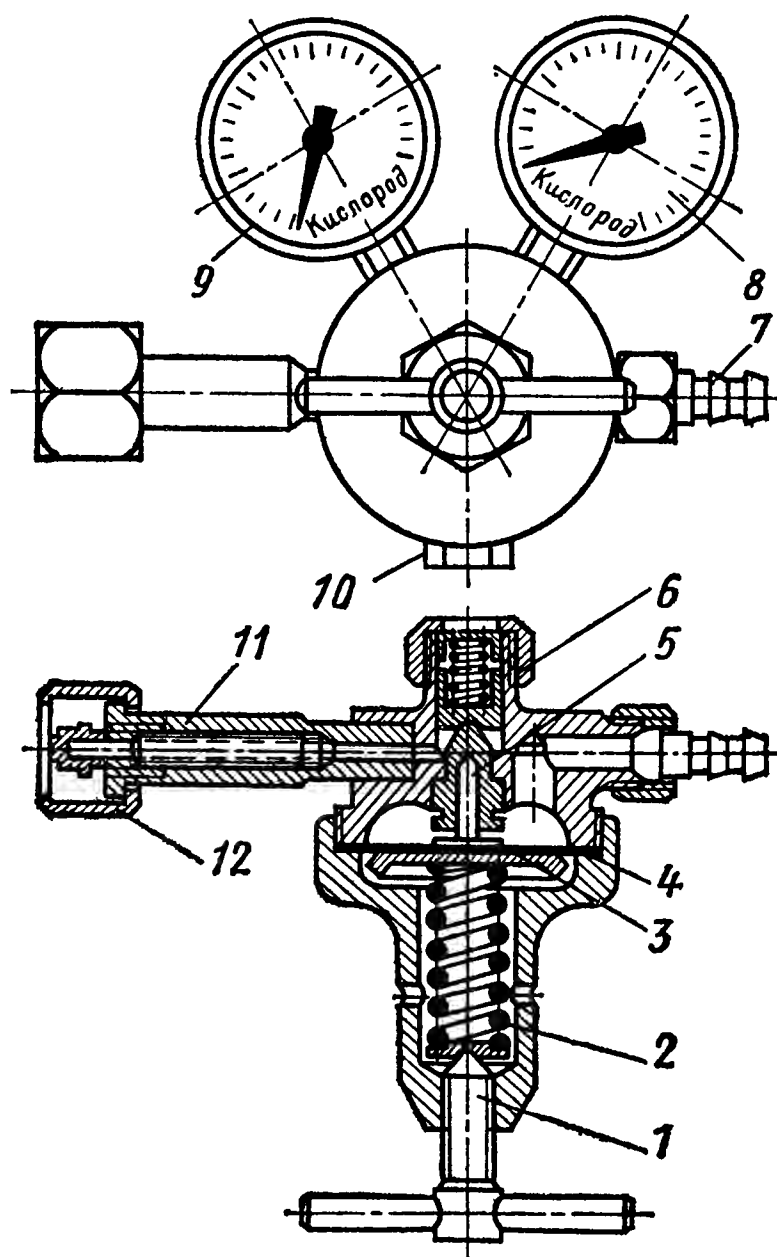


Рис. 55. Кислородный редуктор РК-53

8318—57*, тип Г, рассчитаны на номинальное рабочее давление до 10 кгс/см^2 . Нормальная длина шлангов в зависимости от условий работы 8—20 м. В отдельных случаях допускается использование шлангов длиной до 40 м.

Для закрепления шлангов на присоединительных ниппелях аппаратуры (горелок, редукторов и др.) используют специальные хомуты или обвязывают концы шланга мягкой отоженной (вязальной) проволокой не менее чем в двух местах по длине ниппеля.

При подводе к аппаратуре жидких и сжиженных горючих используют специальные шланги, изготовленные из резины, стойкой против разьедания нефтепродуктами. Такие шланги с внутренним диаметром 6,0 мм выпускают по ТУ УТ 726—53, с большими диаметрами — по ГОСТ 8318—57*, тип Б. Шланги типа Б можно использовать и для кислорода, подаваемого под давлением до 15 кгс/см^2 , если они испытаны на гидравлическое давление 50 кгс/см^2 .

Редукторы предназначены для понижения давления газа в баллоне или трубопроводе до рабочего давления, под которым газ должен поступать в горелку, а также для автоматического поддержания давления на заданном уровне.

Устройство однокамерного (одноступенчатого) редуктора показано на рис. 55. Редуктор присоединяют к штуцеру вентиля баллона или трубопровода при помощи

32. Редукторы (ГОСТ 6268—68)

Обозначение редукторов	Наибольшее допустимое давление газа на входе в редуктор, кгс/см ²	Рабочее давление газа, кгс/см ²		Параметры редукторов при наибольшем рабочем давлении газа			Параметры редукторов при наименьшем рабочем давлении газа			
		наибольшее	наименьшее	Наименьшее давление на входе, кгс/см ²	Наибольший расход газа, м ³ /ч	Допустимое изменение рабочего давления, кгс/см ²	Наименьшее давление на входе, кгс/см ²	Наибольший расход газа, м ³ /ч	Допустимое изменение рабочего давления, кгс/см ²	
КБО	200	15	1	35	60	1	3	7,5	0,7	
АБО-5	30	1,2	0,1	3	5	0,2	2	3	0,08	
ПБО-5	25	3		6						
КБД-60	200	15	1	25	60	0,6	2,5	7,5	0,2	
КБД-25		8	0,5	15	25		1,5	3		
АБД-5	30	1,2	0,1	3	5	0,1	2	5	0,05	
МСО-35	3	1,5	0,2	2,5	35	0,15	1,5			17,5
КСО-10	16	5	0,1	7	10	0,2	2			5
АСО-10	1,2	1		1,1		0,1	0,3			
ПСО-6	3	1,5	0,2	2,5	6		1	3		
АРД-30	30	1		1,8	30		0,7	30	0,1	
ПРД-25	25	3		4,6	25	0,15		25	0,15	
АРД-15	30	1		1,8	15	0,05		15	0,05	
КРУ-6000	35	16	3	25	6000	0,4	10	2000	0,4	
КРУ-3000					3000			1000		
КРУ-1500					1500			500		
КРУ-500	200			35	500	0,8		100		
КРУ-250								50		

Примечания: В зависимости от назначения редукторы изготовляют следующих типов: Б — баллонные, Р — рамповые, С — сетевые. По видам газа: А — ацетиленовые, К — кислородные, М — метановые (метановая группа газов), П — пропан-бутановые (пропан-бутановая группа газов). По схеме регулирования: О — одноступенчатые с механической установкой давления, Д — двухступенчатые с механической установкой давления, У — одноступенчатые с пневматической установкой давления от специальных управляющих (пусковых) редукторов.

Пример условного обозначения кислородного баллонного двухступенчатого редуктора с наибольшим расходом газа 60 м³/ч, наибольшим давлением на входе 200 кгс/см² и рабочим давлением от 1 до 15 кгс/см²:

Редуктор КБД-60 $\frac{200}{1-15}$ ГОСТ 6268—68.

накидной гайки 12. Уплотняющим элементом служит фибровая прокладка. При открытом вентиле газ по входному штуцеру поступает в камеру высокого давления. Во входном штуцере помещается фильтр 11, состоящий из нескольких слоев латунной или бронзовой сетки (с ячейками размером примерно 0,3 мм).

В ацетиленовых редукторах фильтром служит фетр или плотный войлок.

В исходном положении выход газа из камеры высокого давления прегражден клапаном 6, плотно прижатым к седлу вставки запорной пружиной. При ввертывании регулирующего винта 1 нажимная пружина 2 перемещает нажимной диск 3 и мембрану 4 до соприкосновения с нажимным шпинделем 5 и сжимается. В тот момент, когда усилие сжатой пружины, действующее через нажимной шпиндель в сторону отрыва клапана от седла, превышает совместное усилие противодействия запорной пружины и давления газа в камере высокого давления, клапан открывается, и газ поступает в рабочую камеру. От крышки редуктора рабочая камера герметично отделена гибкой мембраной 4, изготовляемой из прорезиненной ткани.

Когда в рабочей камере давлением газа на мембрану создается усилие, превышающее усилие нажимной пружины, клапан редуктора закрывается. Если выход газа из рабочей камеры через ниппель 7 открыт, то при отборе газа давление в рабочей камере будет понижаться до тех пор, пока усилие сжатой нажимной пружины не станет больше суммы противодействующих усилий и клапан не откроется вновь, пропустив в рабочую камеру следующую порцию газа. При непрерывном отборе газа колебания клапана столь часты, что практически давление в рабочей камере поддерживается постоянным. Величина рабочего давления зависит от степени сжатия нажимной пружины, т. е. от числа поворотов регулирующего винта 1. Величина исходного давления в баллоне или трубопроводе и устанавливаемого рабочего давления контролируется манометрами 8 и 9. На рабочей камере редуктора устанавливают предохранительный клапан 10.

Редукторы для различных газов, выпускаемые по ГОСТ 6268—68, отличаются цветом окраски корпуса и крышки и присоединительными размерами накидной гайки 12, соответствующими размерам штуцеров вентиля (табл. 32) [26].

ГОРЕЛКИ

Горелки по способу подвода горючего подразделяют на инжекторные (низкого давления) и безынжекторные (высокого давления). В инжекторную горелку горючее поступает в смесительную камеру вследствие разрежения, создаваемого струей кислорода, проходящего через центральное сопло инжекторного устройства. Это позволяет использовать горючие газы с низким избыточным давлением (0,01—0,04 кгс/см²). В безынжекторные горелки горючий газ и кислород подаются под одинаковым давлением (0,4—1,0 кгс/см²).

Горелка (рис. 56) состоит из ствола А и наконечника Б, соединенных между собой накидной гайкой 1. Ствол имеет два присоединительных штуцера 2 (для кислорода и горючего) и два запорно-регулирующих вентиля 3, при помощи которых регулируют состав и мощность пламени. Ствол А, как правило, служит рукояткой горелки. Наконечник Б представляет собой сменный узел горелки. Он состоит из смесительной камеры 4, инжекторного сопла 5 (в горелках низкого давления) или шайбы для дозирования расхода газов (в безынжекторных горелках), трубки 6 для горючей смеси и концевой части 7, называемой мундштуком. Через отверстие в мундштуке горючая смесь выходит в атмосферу и образует при воспламенении и сгорании пламя. Мощность пламени каждого наконечника ограничена пределами устойчивого горения. Мощность пламени регулируется изменением давления кислорода (в инжекторных горелках) или обоих газов (в безынжекторных горелках). Давление изменяется при помощи редукторов или вентиля горелки. Наличие сменных наконечников позволяет использовать одну и ту же горелку для пайки металлов различных толщин и теплофизических свойств.

Характеристики серийно выпускаемых горелок приведены в табл. 33.

Горелки ГСМ-53 широко используют для пайки изделий из цветных и черных металлов (рис. 57).

Кроме горелок, приведенных в табл. 33, для пайки используют горелки, снабженные специальными наконечниками.

Технические характеристики горелки СУ приведены в табл. 34. Данные таблицы действительны для однопламенных и многопламенных мундштуков, так как расход газов для данного номера наконечника не зависит от конструкции мундштука. Преи-

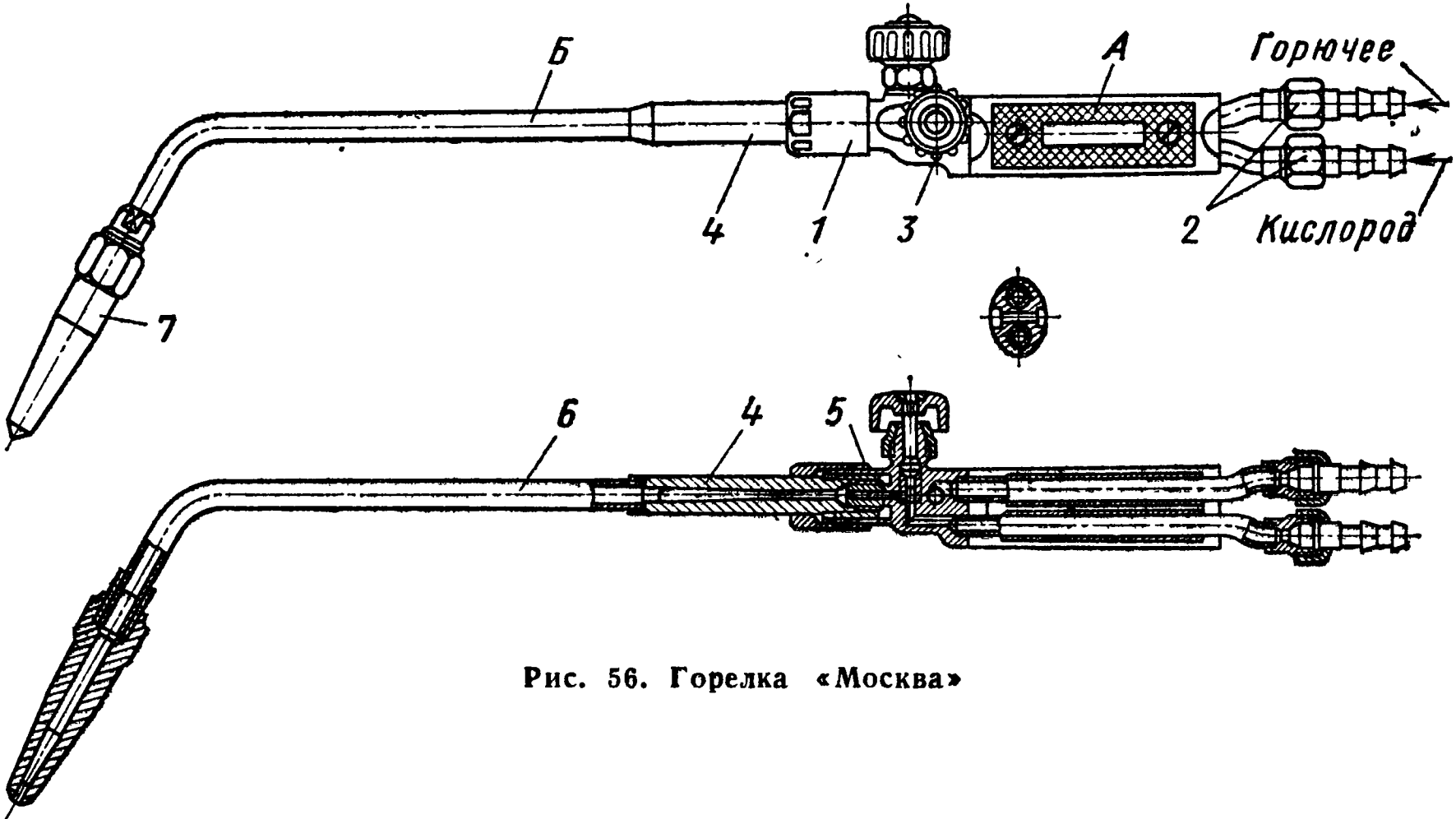


Рис. 56. Горелка «Москва»

муществом горелки СУ также является ее универсальность — она может быть использована при работе с ацетиленом, природным газом, пропаном, нефтяным газом и др. Для этой цели горелку комплектуют специальным наконечником НП-Г

33. Горелки

Тип	Номер наконечника	Примерная толщина нагреваемых стальных деталей, мм	Расход, л/ч	
			ацетилена	кислорода
ГС-53 и «Москва»	1	0,5—1,5	50—125	55—135
	2	1—3	120—240	130—260
	3	2,5—4	230—400	250—430
	4	3,5—7	400—720	430—770
	5	6,5—11	670—1100	730—1200
	6	10—17,5	1030—1750	1150—1975
	7	17—30	1710—2800	1900—3150
ГСМ-53	0	0,2—0,7	20—65	22—70
	1	0,5—1,5	50—125	55—135
	2	1,0—3	120—240	130—260
	3	2,5—4	230—400	250—430

34. Горелки СУ

Газ	Расход, л/ч по номерам наконечников							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Ацетилен	75	150	300	500	750	1200	1700	2500
Кислород	85	165	330	550	825	1320	1870	2750

В отличие от наконечников, используемых при работе с ацетиленом, наконечники НП-Г имеют в мундштуках, инжекторах и смесительных камерах отверстия несколько больших размеров.

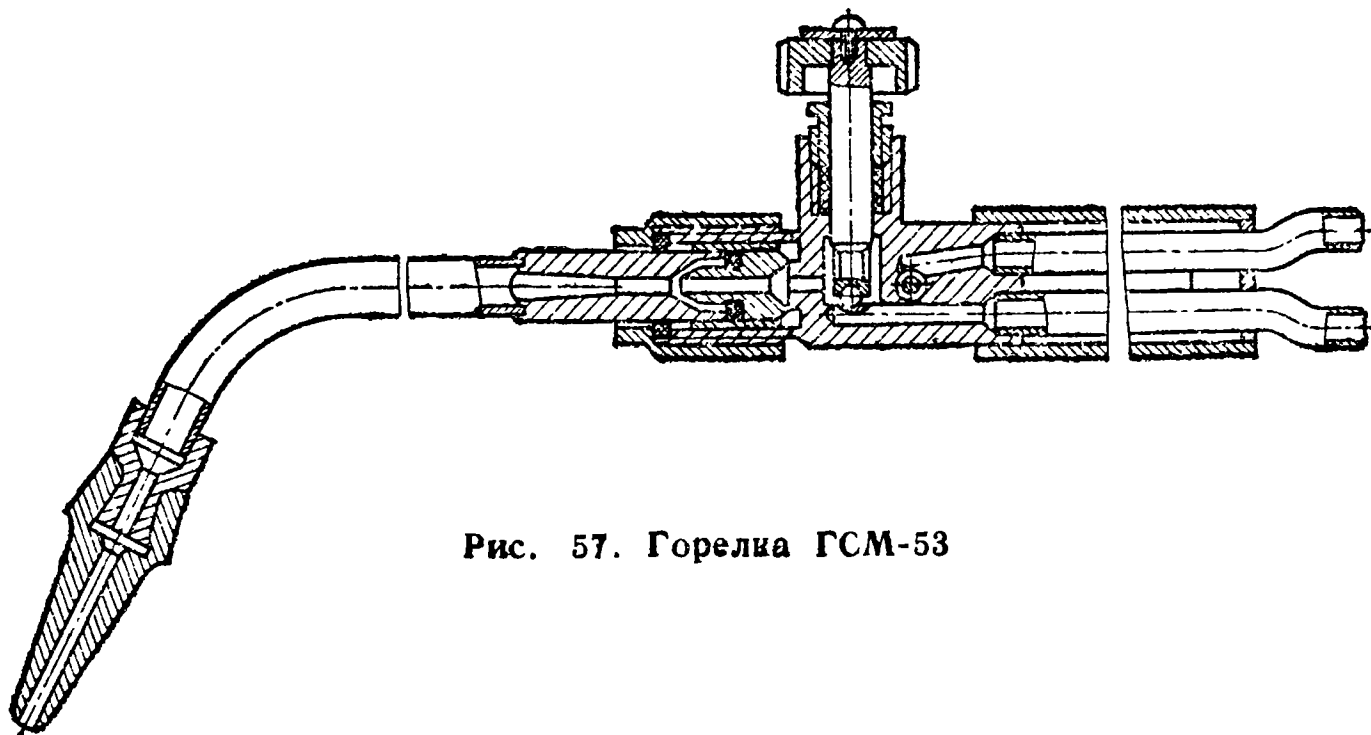


Рис. 57. Горелка ГСМ-53

Головка многопламенной горелки МГ-120, применяемой при пайке труб или цилиндрических деталей диаметром до 120 мм, показана на рис. 58. Горелка состоит из ствола, смесительной камеры с надставкой и головки из двух половин: верхней 1 и нижней 2. Газовая смесь из распределительной камеры 3 попадает в газовые каналы

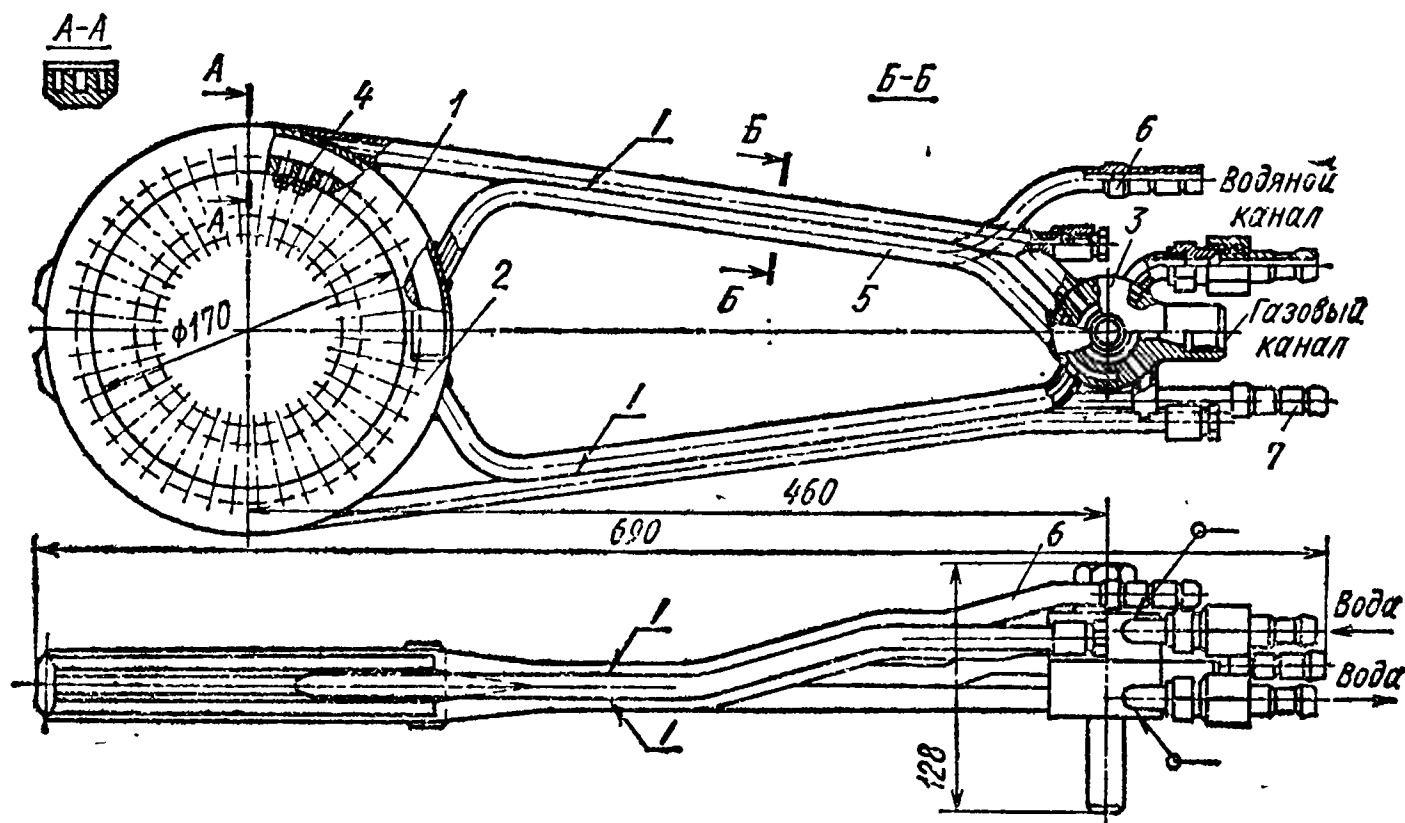


Рис. 58. Головка многопламенной горелки МГ-120

обеих половин головки и подается к сменным мундштукам 4. Вода для охлаждения головки поступает через канал, охлаждает распределительную камеру, проходит по трубке 5 в верхнюю половину 1 головки и возвращается по трубке 6, затем по шлангу (не показан), соединяющему трубки 6 и 7, переходит в нижнюю половину, охлаждает ее и удаляется через второй канал.

Техническая характеристика горелки МГ-120

Диаметр паяемых круглых сечений, мм	90—120	Количество мундштуков	44
Расход ацетилена, л/ч	8400	Охлаждение горелки	Водяное
Оптимальное рабочее давление ацетилена, кгс/см ²	1,5	Масса горелки со стволом, кг	7,2
Рабочее давление кислорода, кгс/см ²	6,0	Размеры горелки со стволом, мм:	
		длина	935
		высота	220

35. Горелки КГ

Тип	Типораз- мер го- релки	Наруж- ный диа- метр паяемых труб, мм	Толщина стенок труб, мм	Диаметр паяемого сечения, мм	Мощность горелки (по аце- тилену), м³/ч	Типораз- мер ствола горелки	Длина наружной части мундшту- ка, мм
КГ-40	I	30—40	3—6	—	0,75—1,5	1	13
КГ-40А			6—12	—	1,5—3,0	2	
КГ-50		40—50	3—6	30—40	0,75—1,5	1	8
КГ-50А			6—12		1,5—3,0	2	
КГ-60	II	50—60	3—6	40—50	1,25—2,5		13
КГ-60А			6—12		2,5—5,0		
КГ-70		60—70	3—6	50—60	1,25—2,5		8
КГ-70А			6—12		2,5—5,0		
КГ-80	III	70—80	3—6	—	1,5—3,0		13
КГ-80А			6—12	60—70	3,0—6,0		
КГ-90		80—90	3—6	—	1,5—3,0		8
КГ-90А			6—12	70—80	3,0—6,0		
КГ-100	IV	90—100	3,5—7	—	2,5—5,0	13	
КГ-100А			7,0—14	80—90	5,0—10,0		3
КГ-110		100—110	3,5—7	—	2,5—5,0	2	8
КГ-110А			7—14	90—100	5,0—10,0	3	
КГ-120	V	110—120	3,5—7	—	2,75—5,5	2	13
КГ-120А			7—14	100—110	5,5—11,0	3	
КГ-130		120—130	3,5—7	—	2,75—5,5	2	8
КГ-130А			7—14	110—120	5,5—11,0	3	
КГ-140	VI	130—140	3,5—7	—	3,3—6,6	2	13
КГ-140А			7—14	—	6,6—13,2	3	
КГ-150		140—150	3,5—7	—	3,3—6,6	2	8
КГ-150А			7—14	—	6,6—13,2	3	
КГ-160	VII	150—160	3,5—7	—	3,75—7,5	2	13
КГ-160А			7—14	—	7,5—15,0	3	
КГ-170		160—170	3,5—7	—	3,75—7,5	2	8
КГ-170А			7—14	—	7,5—15,0	3	

Примечание. Горелки с индексом А предназначены для пайки труб с толщиной стенок до 14 мм и стержней диаметром до 120 мм; без индекса — для пайки труб с толщиной стенок до 8 мм и стержней диаметром до 60 мм.

Кольцевые многопламенные горелки серии КГ используют для пайки изделий круглого и трубчатого сечения — труб наружным диаметром 30—170 мм и толщиной стенок 3—14 мм, стержней диаметром 30—120 мм [15].
Технические характеристики горелок КГ приведены в табл. 35.

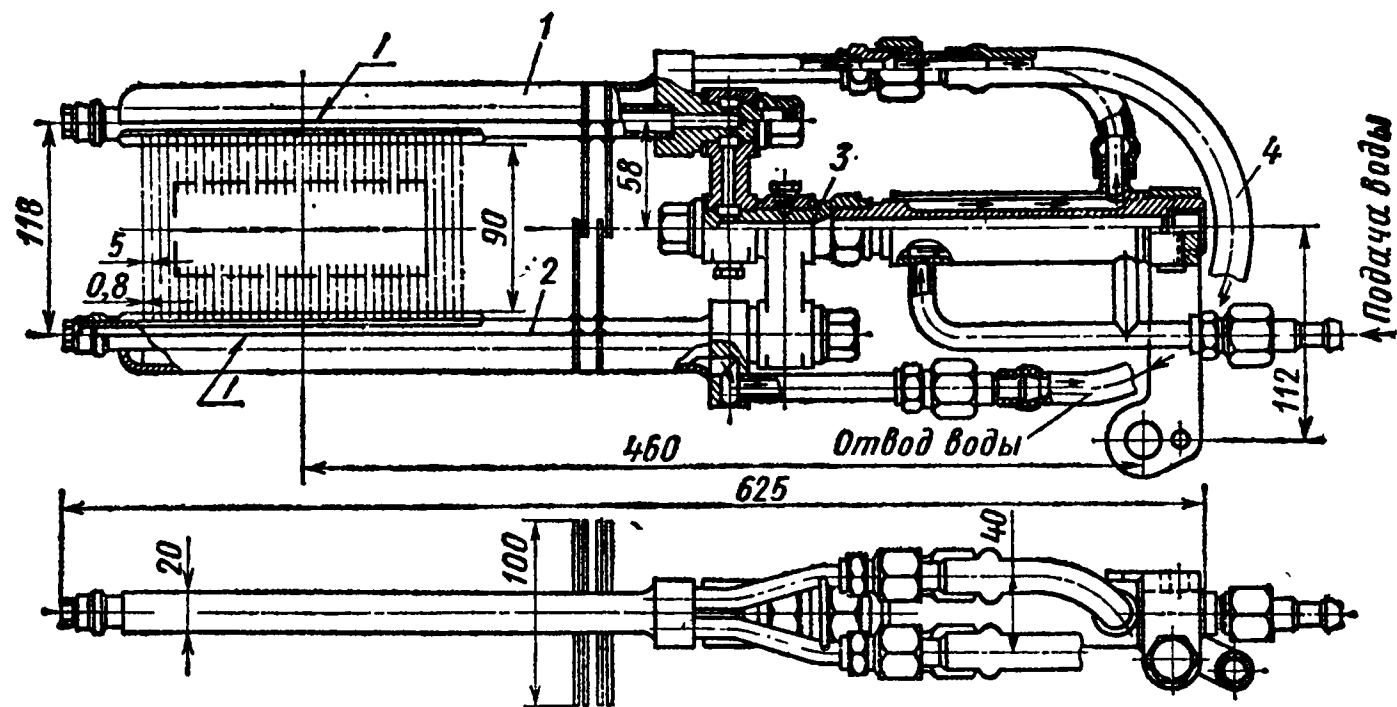


Рис. 59. Головка многопламенной горелки МГ-ДС

В случаях пайки изделий прямоугольного сечения применяют многопламенную горелку МГ-ДС, головка которой показана на рис. 59. Верхний 1 и нижний 2 наконечники головки шарнирно соединены с газораспределительной камерой 3 так, что расстояние между наконечниками может изменяться в пределах 60—90 мм. Водяные каналы охлаждающей системы обоих наконечников связаны шлангом 4.

Техническая характеристика горелки МГ-ДС

Сечение паяемых изделий, мм ² (20÷50)×140	Общее число сопл	74
Расход ацетилена, л/ч 8000	Охлаждение горелки	Водяное
Оптимальное рабочее давление ацетилена, кгс/см ² 1,5	Масса горелки со стволом, кг	8
Рабочее давление кислорода, кгс/см ² 5—6	Размеры горелки со стволом, мм:	
	длина	925
	высота	230

При использовании природного и промышленного газов применяют специальные наконечники, которые отличаются от многосопловых наконечников горелок для ацетилено-кислородной пайки только размерами отверстий в мундштуках, инжекторах и смесительных камерах.

Технические характеристики наконечников НЗП приведены в табл. 36.

36. Наконечники НЗП

Номер наконечника	Расход, л/ч			
	Метан (природный газ)	Коксовый газ	Городской газ (типа московского)	Пропано-бутановая смесь
0	40—120	75—230	50—150	20—50
1	120—280	230—120	150—340	50—120
2	210—530	500—990	340—630	115—230
3	500—810	930—1550	600—980	215—350
4	800—1300	1540—2450	980—1560	350—550
5	1100—1870	2080—3460	1350—2220	474—800
6	1170—2900	3200—5380	2120—3520	730—1200

37. Горелки ГЗМ

Параметры	Номер наконечника			
	0	1	2	3
Давление кислорода, кгс/см ²	0,5—3,0	1—4	1,5—3	2—4
Расход кислорода, л/ч	50—140	105—280	260—540	520—840
Давление пропана, кгс/см ²		Не ниже 1,01		
Расход пропана, л/ч	15—40	30—70	70—140	140—240

38. Горелки ГЗУ

Параметры	Номер наконечника						
	Односопловые мундштуки				Сетчатые мундштуки		
	1	2	3	4	5	6	7
Давление кислорода, кгс/см ²	2—5	2,5—4	3—5	3—5	3—5	3—5	3—5
Расход кислорода, л/ч	105—260	260—540	520—840	840—1400	1350—2200	2200—3600	3500—5800
Давление пропана, кгс/см ²				Не ниже 1,01			
Расход пропана, л/ч	30—70	70—140	140—240	240—400	400—650	650—1000	1050—1700

Инжекторные пропано-бутано-кислородные горелки типа ГЗМ-62 и ГЗУ-1-6 используются при пайке как заменители ацетилено-кислородных горелок. Они могут работать также на метане, природном и городском газах среднего и низкого давления. Технические характеристики этих горелок приведены в табл. 37 и 38.

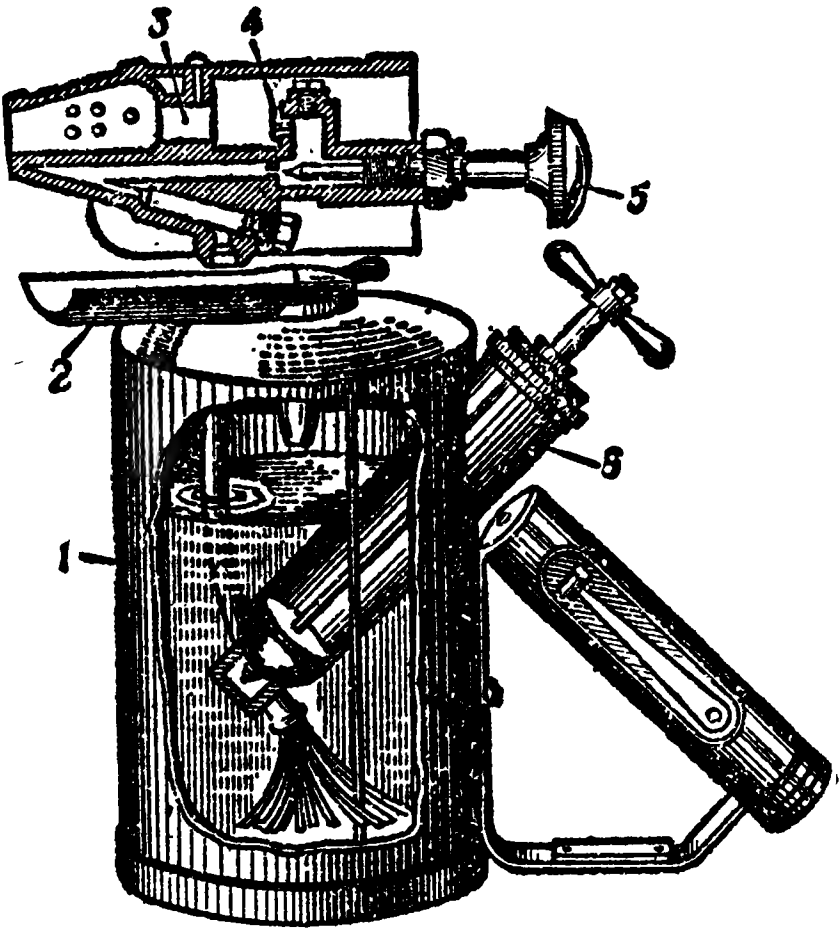


Рис. 60. Паяльная лампа:

1 — резервуар для горючего; 2 — ванночка для разжигания лампы; 3 — смешительная камера; 4 — сопло; 5 — рукоятка регулятора; 6 — насос

а также в условиях монтажа подземных коммуникаций кабельных силовых линий, радио и телефонной сетей. Паяльные лампы работают преимущественно на жидком топливе (керосине, бензине, спирте), а также на сжиженных газах (бутане, пропане и др.).

Применяемые для пайки керосино-кислородные горелки по конструкции отличаются от ацетилено-кислородных. Горелки этого типа имеют специальный испаритель, в котором керосин подогревается пламенем отдельного подогревающего сопла. Горелки, работающие на керосино-кислородной смеси, выпускают двух типов: ГКУ-55 и ГКР-1-57. Они снабжены однопламенными и сетчатыми сменными мундштуками и комплектуются бачками для питания горелок керосином. Основные технические данные керосино-кислородной горелки ГКУ-55 приведены в табл. 39, а горелки ГКР-1-57 — в табл. 40.

Наряду с керосино-кислородными горелками для пайки изделий применяют и бензовоздушные горелки (табл. 41), их используют также как обогреваемый газом паяльник.

Паяльные лампы (рис. 60) применяют при пайке изделий небольших габаритов низкотемпературными припоями,

39. Горелки ГКУ-55

40. Горелки ГКР-1-57

Номер мундштука	Диаметр дюзы, мм	Расход, керосина, кг/ч	Кислород	
			Давление, кгс/см ²	Расход, м ³ /ч
2	2,5	Одно-пламенные 0,16—0,46	3	0,30—0,80
3		0,3—0,8		0,5—1,4
4		0,4—1,0	5	0,7—1,8
5		0,6—1,5		1,0—2,7
4—5	3,7	Сетчатые 0,67—1,9		1,2—3,2
6—7		1,5—4,0		3,2—7,2
Примечание. Давление керосина в бачке 1,5—3,0 кгс/см ² .				

Номер мундштука	Расход керосина, кг/ч	Кислород	
		Давление, кгс/см ²	Расход, м ³ /ч
1	Одно-пламенные 0,3—0,7	3—4	0,6—1,4
2	0,6—1,1		1,2—2,2
3	0,9—2,1		1,8—4,2
4	Сетчатые 1,2—2,5	3—4	2,4—5,0
5	2,6—3,4	4	3,2—6,8
Примечание. Давление керосина в бачке 1,5—3,0 кгс/см ² .			

41. Бензовоздушная горелка

Размеры мундштука и паяльника	Воздух		Расход бензина, г/ч
	Давление, кгс/см ²	Расход, л/ч	
Газовая горелка с диаметром сопла наконечника, мм: 20	0,1—1,0	130—1800	20—400
30	0,1—1,5	140—2700	20—520
Газовый паяльник с массой наконечника, г: 90; 240	0,1—0,5	130—1260	20—220
30; 40	0,1—0,2	130—270	20—40

ПАЯЛЬНИКИ

Паяльники с периодическим нагревом в процессе работы подогревают от постоянного источника тепла. Для удобства работы паяльники выполняют молотковыми или торцовыми (рис. 61). В ряде случаев для специальных работ паяльники изготавливают с фасонным наконечником.

Одним из видов электропаяльника периодического действия является дуговой паяльник, конструкция которого показана на рис. 62. Нагрев паяльника осуществляется электрической дугой, периодически возбуждаемой между угольным электродом, помещенным внутри паяльника, и наконечником. Ток, питающий дугу, подводится к контактам 2 и 3 так, что угольный электрод через державку 1 присоединяется к одной фазе, а тело паяльника 4 — к другой. Паяльник с электродуговым подогре-

42. Электропаяльники

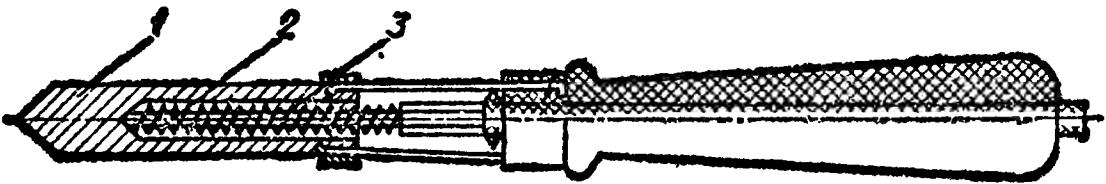
Параметры	1	2	3	4	5	6
Напряжение питающей сети, В	220	127	36	24	12	6
Потребная мощность, Вт	80	80	150	80	80	80
Сила тока, А	0,36	0,73	6,45	3,30	6,70	13,30
Диаметр провода обмотки, мм	0,80	0,15	0,70	0,50	0,85	1,40
Сечение провода обмотки, мм ²	0,00509	0,0177	0,385	0,196	0,567	1,54
Сопротивление нагревательной обмотки, Ом	610	150	5,76	7,3	1,8	0,45
Длина провода обмотки, мм	270	230	200	125	90	60
Диаметр наконечника, мм	5	5	8	5	5	5

Примечания: 1. Материал нагревателя — нихромовая проволока.
2. Температура нагрева нагревателя 700 °С.
3. Температура рабочей части наконечника 280 °С.
4. Срок службы нагревателя 200 ч.

На рис. 64 показан электропаяльник с внутренним спиральным нагревателем. Данные некоторых таких паяльников представлены в табл. 43.

Рис. 64. Электропаяльник с внутренним нагревателем:

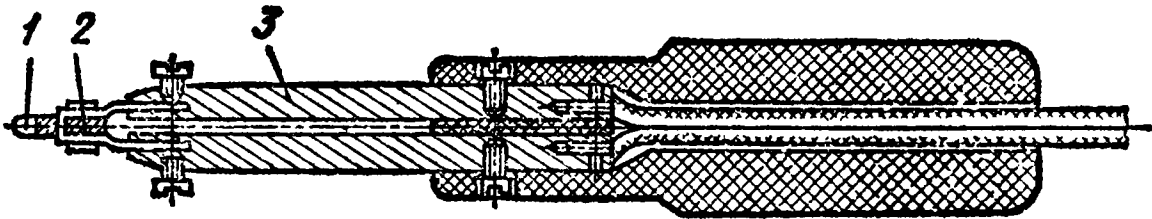
- 1 — медный наконечник;
2 — изолятор; 3 — нагреватель



В электропаяльнике с петлеобразным нагревателем (рис. 65) отсутствует нихромовая обмотка с изоляцией. Нагревателем служит нихромовый элемент в виде петли. Паяльники изготовляют малогабаритными, мощностью 10 Вт для пайки мелких деталей.

Рис. 65. Электропаяльник с петлеобразным нагревателем:

- 1 — медный наконечник;
2 — нагреватель; 3 — корпус паяльника



Для пайки массивных деталей используют более мощные паяльники. Молотковый электропаяльник мощностью более 200 Вт показан на рис. 66. В нем нагреватель из нихромовой проволоки размещен вокруг медного наконечника, который вместе

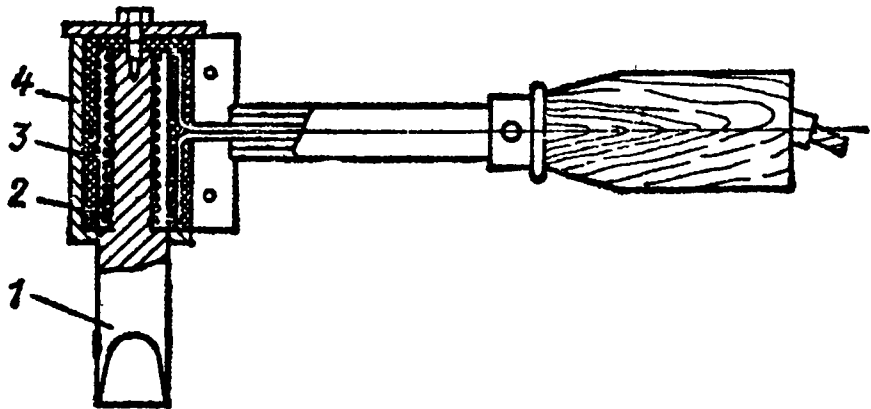


Рис. 66. Электропаяльник молотковый:
1 — медный наконечник; 2 — нагреватель;
3 — изолятор; 4 — металлический кожух

с нагревателем помещен в металлическом кожухе, заполненном изоляционным материалом.

При изготовлении однотипных паяных изделий в серийном и массовом производстве используют электропаяльники с механизированной подачей припоя к месту

43. Электропаяльники типа ПВ и ПВС [38]

Марка	Мощ- ность, Вт	Напря- жение, В	Диаметр и длина паяльного стержня, мм	Данные нагревателя *			
				<i>d</i>	<i>D</i>	<i>l_н</i>	<i>l</i>
ПВ-5	5	36	3×25	0,07	2	10	16
ПВ-10	10	36	4×30	0,10	2,5	11	19
ПВ-15	15	36	5×50	0,12	2,5	12	20
ПВС-15	15	36	5×30 4×35 3×40				
ПВ-20	20	36	6×60	0,16	3	18	26
ПВС-20	20	36	6×30 5×35 4×40	0,16	3	18	26
ПВ-30	30	36	8×75	0,20	4	18	26
		127		0,10	4	29	37
		220		0,07	4	30	38
ПВС-30	30	36, 127	8×40	0,07	4	30	38
		220	6×45				
ПВ-40	40	36	10×80	0,28	5	30	38
		127		0,11	4	28	36
		220		0,08	3,5	37	45
ПВС-40	40	36, 127	10×40	0,08	3,5	37	45
		220	8×50				
ПВ-50	50	36	10×90	0,30	5	28	36
		127		0,12	3,5	33	41
		220		0,10	4,5	41	49
ПВ-75	75	36	15×100	0,4	6	38	46
		127		0,18	5	51	59
		220		0,12	4,5	52	60
ПВ-100	100	36 127 220	Масса меди 350—400 г	Два нагревателя по 50 Вт			
ПВ-150	150	36 127 220	Масса меди 500—600 г	Два нагревателя по 75 Вт			
ПВ-300	300	36 127 220	Масса меди 800—900 г	Четыре нагревателя по 75 Вт			

* *d* — диаметр проволоки; *D* — диаметр основания изолятора; *l_н* — длина намотки; *l* — полная длина нагревателя.

пайки. На рис. 67 показан электропаяльник с полуавтоматической подачей трубчатого или проволочного припоя 4 к рабочей части наконечника 1. Кнопка 2, приводящая в действие механизм подачи припоя, расположена сверху на ручке паяльника 3, и связана с толкателем через рычаг. Номинальное напряжение 36 В, потребляемая мощность 35 Вт, температура рабочей части наконечника до 350° С [5].

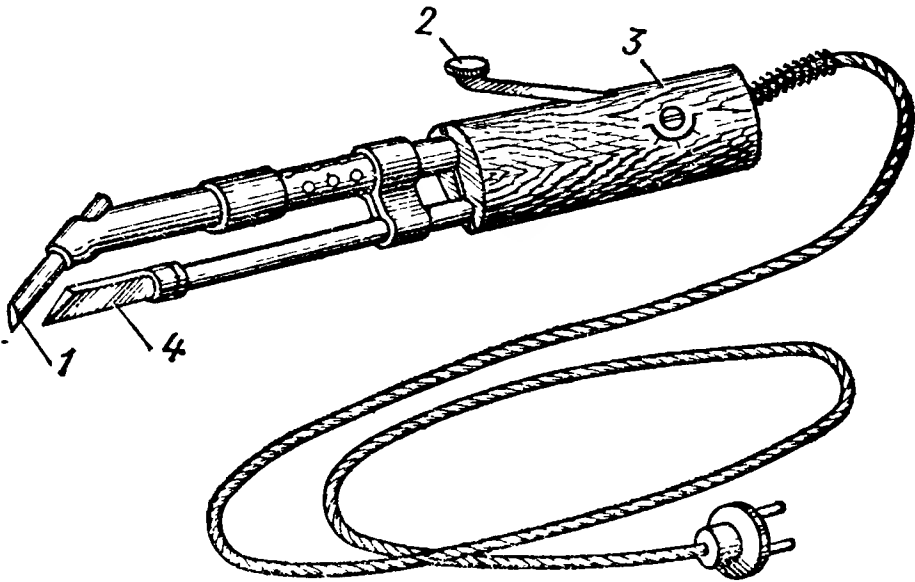


Рис. 67. Электропаяльник полуавтоматический:
1 — медный наконечник; 2 — кнопка подачи припоя; 3 — рукоятка; 4 — припой

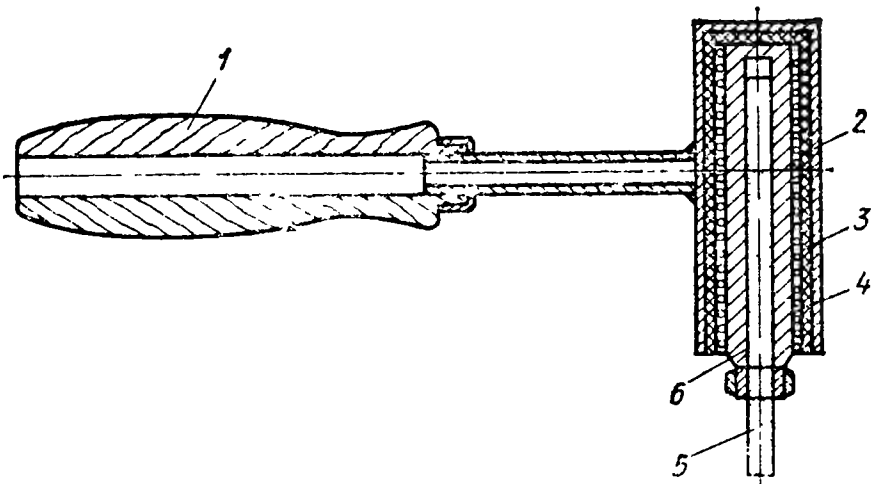


Рис. 68. Электропаяльник абразивный

Электропаяльники ультразвуковые. Для лужения и пайки алюминиевых изделий низкотемпературными припоями применяют ультразвуковые паяльники [22]. Технические характеристики ультразвуковых паяльников УП-21 и УП-42 приведены в табл. 44.

Наряду с ультразвуковыми паяльниками для лужения алюминия применяют абразивные электропаяльники. В отличие от обычных электропаяльников абразивные имеют рабочий стержень 5 (рис. 68), спрессованный из порошка припоя и асбеста, играющего роль абразива. Стержень вставлен в медную втулку 6, обогреваемую нихромовым нагревателем 4, который размещен в асбестовом изоляторе 3 и кожухе 2, к которому прикреплена рукоятка 1.

44. Ультразвуковые электропаяльники

Параметры	УП-21	УП-42	Параметры	УП-21	УП-42
Рабочая частота, кГц	20	23– 26	Габаритные размеры, мм:		
Мощность, Вт:			генератора	333×310×	250×235×
генератора	40	30	×250	×180	
нагревателя	100	170	паяльника	300×170×50	260×150×45
Напряжение, В	110–127–	220	Масса, кг:		
	220		генератора	14	11
Частота питающего тока, Гц	50	50	паяльника	1,0	0,9
Примечание. Установку УП-21 комплектуют ванной размерами 288×200×162 мм.					

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
И РЕГУЛИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА

В производстве паяных изделий применяют приборы для измерения температуры, а также устройства, поддерживающие ручную или автоматически заданный тепловой режим. Приборы теплового контроля подразделяют на показывающие, самопишущие и сигнализирующие, могут быть применены сочетания этих видов приборов. По принципу работы приборы теплового контроля делят на жидкостные, манометрические, термометры сопротивления, оптические пирометры и др.

ТЕРМОМЕТРЫ

Термометры сопротивления применяют для измерения температур до 650° С. Простейшая схема включения термометра сопротивления изображена на рис. 69. При равенстве плеч моста стрелка прибора находится в нулевом положении. При изменении сопротивления одного из плеч моста, например *R4*, в качестве которого

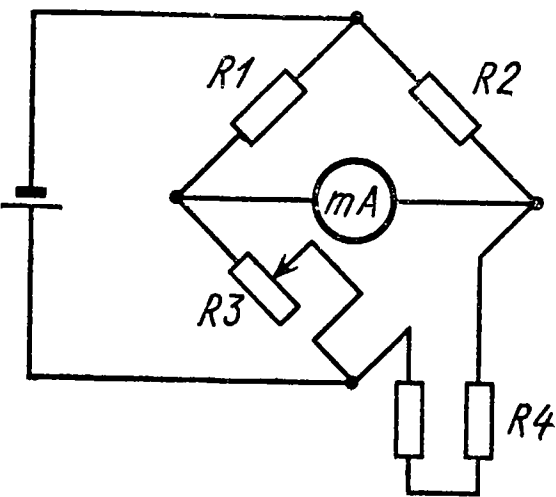


Рис. 69. Схема включения термометра сопротивления

может быть использован термометр, равновесие нарушается. Для восстановления равновесия необходимо изменить сопротивление *R3*.

По положению движка реохорда можно судить о сопротивлении термометра, а следовательно, и об измеряемой температуре.

Термометры сопротивления по материалу чувствительного элемента подразделяют на платиновые (ТСП) и медные (ТСМ) по ГОСТ 6651—59. Для одновременного измерения температуры одной точки двумя приборами применяют двойные термометры сопротивления, в которых встроены два электрических изолированных один от другого чувствительных элемента.

Термометры манометрические применяют при измерении температуры газовых и жидких сред до 550° С.

Принцип действия прибора основан на свойстве вещества, заключенного в замкнутом объеме, изменять свое давление в зависимости от температуры.

Для измерения температуры и сигнализации о предельно допустимых ее значениях с целью поддержания заданного теплового режима пайки применяют манометрический термометр типа ТС с контактным устройством. Технические характеристики некоторых термометров приведены в табл. 45.

45. Манометрические термометры

Вид	Характеристика	Тип	Длина капилляра, мм
Показывающие	Без дополнительных устройств	ТПГ-180	4; 10; 16; 25; 40
	С сигнальным устройством	ТПГ-188	4; 10
	С пневматическим датчиком	ТПГ-189П	
Самопишущие: для одного параметра для двух параметров	Без дополнительных устройств	ТГС-710М ТГС-710чМ2	4; 10; 16; 25; 40
	С сигнальным устройством	ТГС-718ПЭ	4; 10
	С пневматическим датчиком	ТСГ-710П ТСГ-710ПчМ	
	Без дополнительных устройств	ТСГ-720 ТСГ-720чМ	4; 10; 16; 25; 40
Примечания: 1. Самопишущие приборы с индексом «ч» имеют привод диаграммы от часового механизма с восьмисуточным заводом, а остальные — от синхронного двигателя 220 В, 50 Гц, 12 ВА. 2. Время одного оборота диаграммы 24 ч.			

ПОТЕНЦИОМЕТРЫ АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ

Потенциометры автоматические электронные предназначены для измерения, записи и регулирования температуры. Потенциометры изготавливают по ГОСТ 7164—71. Принципиальная схема одноточечного показывающего потенциометра дана на рис. 70. Измерение температуры производится компенсационным методом. Измеряемая э. д. с. термопары 1 сравнивается с напряжением в диагонали AB мостовой схемы $R1—R4$. В диагональ CD включен источник стабилизированного питания постоянным током 3 (типа ИПС, СН). При работе потенциометра разность э. д. с. термопары и напряжения, снимаемого с диагонали AB мостовой схемы, подается на вход электронного усилителя 4. Если измеряемая э. д. с. равна этому напряжению, то к усилителю подводится нулевой сигнал, при этом вся система находится в равновесии. При изменении э. д. с. равновесие системы нарушается и на вход усилителя подается напряжение разбаланса. Последнее преобразуется вибропреобразователем в переменное напряжение, усиливается и приводит в действие реверсивный двигатель 5, который перемещает ползунок реохорда 2 до момента, когда разность между измеряемой э. д. с. и напряжением на диагонали AB станет ниже порога чувствительности усилителя.

С двигателем также связана стрелка 6, перемещающаяся относительно шкалы. Градуировка шкалы производится непосредственно в градусах Цельсия (при работе с термопарой или радиационным пирометром) или в других единицах.

В производстве паяных изделий во многих случаях необходима регистрация температурно-временных режимов процесса. В этом случае используют самопишущие потенциометры, которые отличаются от показывающих наличием устройства автоматической записи.

Для работы со стандартными термопарами, которые устанавливают в помещениях, где имеют место сильные магнитные поля, включение прибора необходимо осуществлять через разделительный трансформатор, а каждый провод термопары заземлить через конденсатор емкостью 1—5 мкф.

Для целей позиционного регулирования и сигнализации в приборы встраивают контактные устройства, снабженные узлом дифференциала, которые обеспечивают подачу и снятие сигнала при разных значениях температуры. Потенциометры изготавливают в корпусе, приспособленном для настенного или щитового монтажа (допускаемая толщина щита 2—32 мм).

Потенциометры показывающие типа ЭПВ2, ПП4 и ППР4 — малогабаритные приборы. Показания температуры осуществляются цилиндрической шкалой, перемещающейся относительно неподвижного указателя. В многоточечных приборах поочередное подключение термопар производят вручную кнопочным переключателем. В табл. 46 приведены наиболее распространенные показывающие потенциометры и мосты в малогабаритном и миниатюрном исполнении различной модификации. Габаритные размеры прибора типа ЭПВ2 330 × 263 × 435 мм. Потенциометры автоматические электронные ПП4 и ППР4 относят к регуливающим миниатюрным приборам для одной точки измерения. Габаритные размеры: 204 × 198 × 385 мм.

Потенциометры самопишущие с записью на дисковой диаграмме типа ЭП, ЭПД и ПЭД-250 предназначены для регулирования и регистрации температурно-временных параметров процесса пайки (табл. 47).

Потенциометры автоматические ЭП-120 и ЭП-107 отличаются один от другого тем, что время прохождения стрелкой всей шкалы составляет соответственно 20 и 7 с. Кроме приборов, приведенных в табл. 47, выпускаются модификации приборов со встроенными ферродинамическими преобразователями ПФЗ—ПФ6 или струнным преобразователем ПС, или с пневматическим преобразователем ПП. В приборы с программным задатчиком преобразователи не встраивают. Потенциометры типа ПЭД-250 выполняют в малогабаритном корпусе (рис. 71).

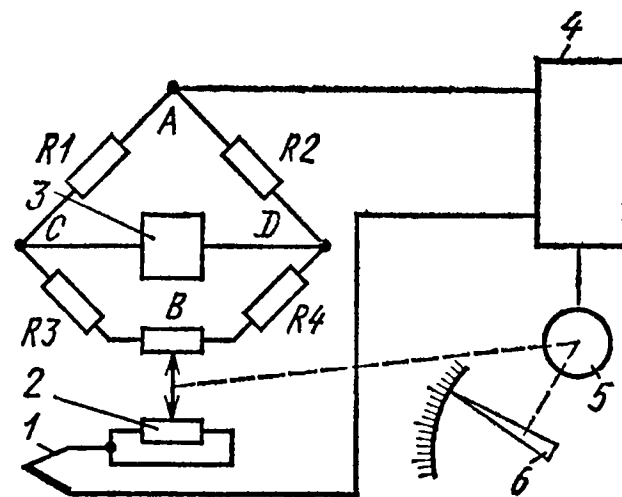


Рис. 70. Принципиальная схема одноточечного показывающего потенциометра

46. Показывающие потенциометры и мосты в малогабаритном и миниатюрном исполнении

Потенциометры		Мосты			Число точек измерения	Дополнительные устройства *2
малогабаритные типа ЭПВ2	миниатюрные типа ПП4 и ППР4	малогабаритные типа ЭМВ2		миниатюрные типа МП и МПР		
		постоянного тока	переменного тока			
ЭПВ2-01	ПП4-05	ЭМВ2-101	ЭМВ2-201	МП4-05	1	—
ЭПВ2-02	—	ЭМВ2-102	ЭМВ2-202	—		1Р
ЭПВ2-03	—	ЭМВ2-103	ЭМВ2-203	—		1Р; 1С
ЭПВ2-04	—	ЭМВ2-104	ЭМВ2-204	—		1Р; 2С
ЭПВ2-05	—	ЭМВ2-105	ЭМВ2-205	—		2Р
ЭПВ2-06	ППР4-01	ЭМВ2-106	ЭМВ2-206	МПР4-01		2Р, 1С
ЭПВ2-07	—	ЭМВ2-107	ЭМВ2-207	—		Д
ЭПВ2-08А	—	ЭМВ2-108А	ЭМВ2-208А	—		3Р
ЭПВ2-10А	ПП4-05	ЭМВ2-110А	ЭМВ2-210А	МПР4-05		5Р
ЭПВ2-11А	ППР4-08	ЭМВ2-111А	ЭМВ2-2100А	МПР4-08		6Р
ЭПВ2-12	—	ЭМВ2-112	ЭМВ2-212	—	6	—
ЭПВ2-13*1	—	ЭМВ2-113*1	ЭМВ2-213*1	—	12	—
ЭПВ2-14	—	ЭМВ2-114	ЭМВ2-214	—		—
ЭПВ2-15	—	ЭМВ2-115	ЭМВ2-215	—	1	1Р, Д
ЭПВ2-16	—	ЭМВ2-116	ЭМВ2-216	—		1Р, 1С, Д
ЭПВ2-17	—	ЭМВ2-117	ЭМВ2-217	—		1Р, 2С, Д
ЭПВ2-18	ППР4-03	ЭМВ2-118	ЭМВ2-218	МПР4-03		2Р, Д
ЭПВ2-19	ППР4-04	ЭМВ2-119	ЭМВ2-219	МПР4-04		2Р, 1С, Д
—	ППР4-02	—	—	МПР4-02		3Р, Д
—	ППР4-06	—	—	МПР4-06		2Р, Д
—	ППР4-07	—	—	МПР4-07		5Р, Д

*1 Снабжены устройством для подключения на самопишущий прибор.

*2 Условные обозначения дополнительных устройств (регулирующих Р, анализирующих С и устройств дополнительной передачи Д): 1Р — реостатный задатчик с зоной пропорциональности 10 и 20%; 2Р — с зоной пропорциональности 100%; 3Р — однопозиционные; 5Р — двухпозиционные с двумя указателями; 6Р — трехпозиционные для одной точки; 1С — одноконтактные аварийные; 2С — одноконтактные аварийные с регулируемой зоной сигнализации; 3С — двухконтактные.

Потенциометры самопишущие с записью на ленточной диаграмме типа ЭПП, ПС1, ПСР1, ПСМ2 и ПСМР2 выпускают различных модификаций. Некоторые характеристики потенциометров и мостов, широко применяемых в промышленности, даны в табл. 48.

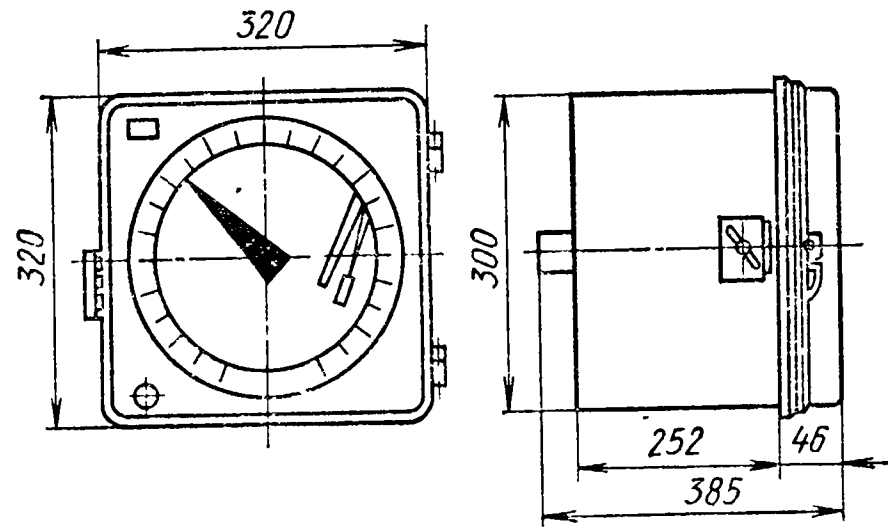


Рис. 71. Общий вид потенциометра ПЭД-250

Электронный потенциометр ЭПП-07МЗ характерен наличием программного задатчика, представляющего собой профилированный диск, выполненный по заданному режиму.

Многоточечные потенциометры ЭПР-09МЗ и ЭПР-16АМЗ снабжены устройством для двух- или трехпозиционного регулирования на каждой точке одним общим заданным значением параметра. В приборах для двухпозиционного регулирования предусмотрена аварийная сигнализация с регулируемой зоной как общая для всех каналов регулирования, так и коммутируемая по каждому каналу.

Многоточечные потенциометры ЭПР-09РМЗ, ЭПР-16РМЗ предназначены для двух- или трехпозиционного регулирования на каждой точке с независимым заданием для каждой точки, со встроенным задающим устройством. Габаритные размеры прибора: 475×450×366 мм (завод «Лентеплоприбор») и 507×483×366 мм (завод «Электроавтоматика»).

47. Потенциометры и мосты с записью на дисковой диаграмме

Потенциометры		Мосты				Дополнительные устройства *2	
Модель ЭПД	Модель ПЭД-250*1	Модификации ЭП-120 и ЭП-107	Модель ЭМД		Модель МЭД-250 постоян- ного тока		
			перемен- ного тока	постоян- ного тока			
4801М	1000	ЭП-120; ЭП-107	4804М	4807М	1000	ЭМ-120; ЭМ-107	—
4802М	1300	ЭПД-120; ЭПД-107	4805М	4808М	1300	ЭМД-120; ЭМД-107	4Р или 6Р**3
4803М	—	ЭПИ-120; ЭПИ-107	4806М	4809М	—	ЭМП-120; ЭМП-107	7Р
4812М	1100	ЭПП-120, ЭПП-107	4815М	4818М	1100	ЭМП-120; ЭМП-107	1Р*4
4813М	—	—	4816М	4819М	—	—	1Р; 1С
4814М	—	—	4817М	4820М	—	—	1Р; 2С
4823М	—	—	4821М	4822М	—	—	7Р; 1С
4824М	1200	ЭПП-120; ЭПП-107	4827М	4830М	1200	ЭМД-120; ЭМП-107	2Р
4825М	—	—	4828М	4831М	—	—	2Р; 1С
4826М	—	—	4829М	4832М	—	—	2Р; 2С
—	1001	ЭП-120-С, ЭП-107-С	—	—	1001	ЭМ-120-С, ЭМ-107-С	3С
—	1101	ЭПП-120-С; ЭПП-107-С	—	—	1101	ЭМП-120-С, ЭМП-107-С	1Р*4, 3С
—	1201	ЭПП-120-С; ЭПП-107-С	—	—	1201	ЭМП-120-С; ЭМП-107-С	2Р, 3С
—	1301	ЭПФ-120-С, ЭПФ-107-С	—	—	1301	ЭМД-120-С, ЭМД-107-С	4Р или 6Р, 3С
—	—	ЭПИ-120-С; ЭПИ-107-С	—	—	—	ЭМП-120-С, ЭМП-107,С	7Р; 3С
—	—	ЭПЛ-120, ЭПЛ-107	—	—	—	ЭМЛ-120-С, ЭМЛ-107-С	8Р или 9Р, 3С

*1 Время прохождения указателем шкалы 15 с; в приборах, у которых это время равно 5 с, номера моделей начинаются с цифры 2, например, 2301, 2000 и т. д.

*2 Условные обозначения дополнительных устройств (см. табл. 46): 4Р — двухпозиционный регулятор с одним указателем; 7Р — пневматический изолирующий регулятор; 8Р — программный позиционный регулятор; 9Р — программный реостатный датчик.

*3 С трехпозиционным устройством 6Р выпускают только приборы ЭПД и ЭМД.

*4 Приборы ЭПП и ЭМД имеют только 10- или 100%-ный реостатный задатчик (зону оговаривают в заказе).

48. Потенциометры и мосты с записью на ленточной диаграмме

Параметры	ЭПВ2, ЭМВ2	ППР4, ПП4, МП4, МПР4	ЭПД, ЭМД	ЭП, ЭМ	ПЭД-250, МЭД-250	ЭПП, ЭМП, ЭПР, ЭМР	ПС1, ПСР1, МС1, МСР1	ПСМ2, ПСМР2, МСМ2, МСМР2	ЭППМ, МФПМ	ЭПСМ, МФСМ	КСП1, КПП1, КСМ1, КПМ1	КСП2, КСМ2	КСП4, КСМ4	ЭПС, ЭПП, МФС, МФП
Погрешность измерений, %	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,5*1	± 0,5	± 1,0	± 1,0	± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,25	± 0,5
Погрешность записи, %	—	—	± 1,0	± 1,0	± 1,0	± 0,5-- ± 1,0*1	± 1,0	± 1,0	± 1,0	± 1,0	± 1,0	± 1,0	± 0,5	± 1,0
Время пробега ука- зателем или карет- кой всей шкалы, с	8	3; 5	5; 15	7; 20	5; 15	2,5--8	2,5--8	1*2; 2,5; 6	2,5; 8; 18	2,5; 8; 18	2,5; 10	2,5; 8	1; 2; 8	5; 2,5 16*5
Ширина диаграммы или длина оцифро- ванной части шка- лы, мм	660	315	700	700	600	275	160	100	280	100	100	160	250	100
Скорость диаграмм- ной ленты, мм/ч, или время оборота диаграммы, ч	—	—	24	12; 24 48	24	20--720; 60--1440; 60--9600	20; 40; 60; 120; 240; 360	20; 60 120	—	20; 40; 60; 120	20--54 000; 60 7 200	220	220	10; 20; 40; 60; 120
Напряжение пита- ния, В	127; 220	127	127; 220	127; 220	127; 220	220*3	127; 220	127	127*4	127*5	220	220	220	220
Потребная мощность, ВА	50	30	70	60	50	130	60	50	50	50	12	30	40	35

*1 Для узкопредельных приборов погрешность 1%.
*2 Время пробега 1; 2,5 с должно быть предварительно согласовано с заводом.
*3 Для узкопредельных ЭПП необходим разделительный трансформатор 220/220, 150 ВА.
*4 Необходим разделительный трансформатор.
*5 Только для приборов ЭПР и ЭМР с установкой разных заданных значений по каждому каналу регулирования
*6 Для приборов МФС и МФП время пробега равно 6 или 16 с.

49. Потенциометры и мосты в малогабаритном и миниатюрном исполнении с записью на ленточной диаграмме

Потенциометры		Мосты		Число точек измерения	Время пробега кареткой всей шкалы, с	Дополнительные устройства*1
ПС1, ПСР1	ПСМ2, ПСМР2	МС1, МСР1	МСМ2, МСМР2			
ПС1-01	ПСМ2-01	МС1-01	МСМ2-01	1	8	—
ПС1-02	—	МС1-03	—		2,5	—
ПС1-04	—	МС1-04	—	2	8	—
ПС1-05	—	МС1-05	—		2,5	—
ПС1-06	—	МС1-06	—	3	8	—
ПС1-07	—	МС1-07	—		2,5	—
ПС1-08	—	МС1-08	—	6	8	—
ПС1-09	—	МС1-09	—		2,5	—
ПС1-10	—	МС1-10	—	12	8	—
ПС1-11	—	МС1-11	—		2,5	—
ПС1-12	ПСМ2-02	МС1-12	МСМ2-02		8	Д*2
ПС1-13	—	МС1-13	—		2,5	Д*2
ПСР1-01	ПСМР2-01	МСР1-01	МСМР2-01	1	8	4Р
ПСР1-02	ПСМР2-02	МСР1-02	МСМР2-02			5Р
ПСР1-03	ПСМР2-03	МСР1-03	МСМР2-03			6Р
ПСР1-04	ПСМР2-04	МСР1-04	МСМР2-04			1Р
ПСР1-05	ПСМР2-05	МСР1-05	МСМР2-05			1Р, 1С
ПСР1-06	ПСМР2-06	МСР1-06	МСМР2-06			1Р, 2С
ПСР1-07	ПСМР2-07	МСР1-07	МСМР2-07			2Р
ПСР1-08	ПСМР2-08	МСР1-08	МСМР2-08			2Р, 1С
ПСР1-09	ПСМР2-09	МСР1-09	МСМР2-09			4Р, Д
ПСР1-10	ПСМР2-10	МСР1-10	МСМР2-10			5Р, Д
ПСР1-11	ПСМР2-11	МСР1-11	МСМР2-11			6Р, Д
ПСР1-12	ПСМР2-12	МСР1-12	МСМР2-12			1Р, Д
ПСР1-13	ПСМР2-13	МСР1-13	МСМР2-13			1Р, 1С, Д
ПСР1-14	ПСМР2-14	МСР1-14	МСМР2-14			1Р, 2С, Д
ПСР1-15	ПСМР2-15	МСР1-15	МСМР2-15			2Р, Д
ПСР1-16	ПСМР2-16	МСР1-16	МСМР2-16			2Р, 1С, Д
ПСР1-17	—	МСР1-17	—	2		6Р
ПСР1-18	—	МСР1-18	—	3		6Р
ПСР1-19	—	МСР1-19	—	6		6Р
ПСР1-20	—	МСР1-20	—	12		6Р
ПСР1-48	—	МСР1-116	—	6		6С
ПСР1-49	—	МСР1-117	—	12		6С
ПСР1-50	—	МСР1-118	—	6		7С
ПСР1-51	—	МСР1-119	—	12		7С
ПСР1-52	—	МСР1-120	—	6		8С
ПСР1-53	—	МСР1-121	—	12		8С

*1 Условные обозначения дополнительных устройств (см. табл. 46): 6С — одноконтактные всех точек на одну задачу без блокировки сигнала; 7С — одноконтактные всех точек на одну задачу с блокировкой сигнала; 8С — двухконтактные всех точек на одну задачу с одним указателем без блокировки сигнала.
*2 Сопротивление реохорда дистанционной передачи 300 Ом.

50. Потенциометры и мосты с записью на ленточной диаграмме

Потенциометры			Мосты				Число точек измерения	Время пробега кареткой всей шкалы, с	Дополнительные устройства *1
Для термопар и датчиков Э. Д. С		Для радиационных пирометров		постоянного тока		переменного тока			
Тип	Модель	Тип	Модель	Тип	Модель	Тип	Модель		
ЭПП-07МЗ	07-1	—	—	ЭМП-57ИМЗ	57И-1	ЭМП-67МЗ	67-1	8	8Р
	07-2			—	—	67-2	8	9Р	
	09-4			—	—	—	1*2	—	
	09-1			109И-1	209-2	209-2	2.5 *2	Д	
ЭПП-09МЗ	09-2	ЭПП-16АМЗ	16А-1 16А-2 16А-4 16А-20 16А-11 16А-12 16А-15 16А-14 16А-17 16А-18	ЭМП-109ИМЗ	109И-2	ЭМП-209МЗ	209-1	8	Д
	09-3			109И-3	209-13		209-13		7Р
	09-20			—	209-16		209-16		4С, Д
	09-11			109И-4	209-3		209-3		
	09-12			109И-5	209-6		209-6	—	
	09-13			109И-7	209-7		209-7	—	
	09-14			209И-6	209-4		209-4	—	
	09-15			209И-8	209-5		209-5	—	
	09-16			209И-9	209-8		209-8	—	
	09-17			209И-11	209-15		209-15	8	—
	09-18			209И-10	209-14		209-14		
	ЭПП-15МЗ			15-1	ЭПР-16АМЗ		16А-5 16А-6 16А-7 16А-8 16А-9	—	65-1
15-2		—	65-2	65-2		1Р, 1С, Д			
15-3		—	65-3	65-3		1Р, 2С, Д			
15А-1		55АИ-1	65А-1	65А-1		2Р, Д			
ЭПП-15АМЗ	15А-2	ЭМП-55АИМЗ	55АИ-2	ЭМП-65АМЗ	65АИ-2	ЭМП-65АМЗ	65А-2	2Р, 1С, Д	

ЭПР-09МЗ	15А-3	ЭПР-16АМЗ	16А-10	55АИ-3	65А-3	8	2Р, 2С, Д	
	Р-09-1		Р-16А-1	Р-109И-1	Р-209-1		10Р, 2С	
	Р-09-2		Р-16А-2	Р-109И-2	Р-209-2		10Р, 5С	
	Р-09-3		Р-16А-3	Р-109И-3	Р-209-3		11Р	
	Р-09-4		Р-16А-4	Р-109И-4	Р-209-4		10Р, 2С	
	Р-09-5		Р-16А-5	Р-109И-5	Р-209-5		10Р, 5С	
	Р-09-6		Р-16А-6	Р-109И-6	Р-209-6		11Р	
	Р-09-7		Р-16А-7	Р-109И-7	Р-209-7		10Р, 2С	
ЭПР-09РМЗ	Р-09-8	ЭПР-16АРМЗ	Р-16А-8	Р-109И-8	Р-209-8	2,5	11Р	
	Р-09Р-1		Р-16АР-1	Р-109РИ-1	Р-209Р-1		12Р	
	Р-09Р-2		Р-16АР-2	Р-109РИ-2	Р-209Р-2		12Р	
	Р-09Р-3		Р-16АР-3	Р-109РИ-3	Р-209Р-3		13Р	
	Р-09Р-4		Р-16АР-4	Р-109РИ-4	Р-209Р-4		13Р	
	Р-09РД-1		ЭПР-16АРДМЗ	ЭМР-109РИМЗ	Р-109РДИ-1		Р-209РД-1	12Р
	Р-09РД-2				Р-109РДИ-2		Р-209РД-2	12Р
	Р-09РД-3				Р-109РДИ-3		Р-209РД-3	13Р
Р-09РД-4	Р-109РДИ-4	Р-209РД-4			13Р			
Р-09РД-5	Р-109РДИ-5	Р-209РД-5			12Р			
Р-09РД-6	Р-109РДИ-6	Р-209РД-6			12Р			
Р-09РД-7	Р-109РДИ-7	Р-209РД-7			13Р			
Р-09РД-8	Р-109РДИ-8	Р-209РД-8			13Р			
ЭПР-09РДМЗ		ЭПР-16АРДМЗ	ЭМР-109-РДИМЗ	—	ЭМП-209РДМЗ	12	8	
		—				24	8	

*1 Условные обозначения дополнительных устройств (см табл. 46, 47). 10Р — двухпозиционное для всех точек на одну задачу; 11Р — трехпозиционное для всех точек на одну задачу; 12Р — трехпозиционное для всех точек на разные задачи, 13Р — двухпозиционное для всех точек на разные задачи; 4С — трехконтактное, 5С — одноконтактное, аварийное сигнальное устройство с регулируемой зоной

*2 Изготавлиют с дополнительной сигнализацией: «окончание диаграммной ленты».

*3 Приборы ЭПР-09МЗ и ЭМП-209МЗ выпускают одноточечные с одноконтактным или двухконтактным устройством, а также с электрическим трехпозиционным регулятором одной точки с блоком реле.

Многоточечные потенциометры ЭПР-09РДМЗ отличаются от потенциометров ЭПР-09РМЗ наличием дистанционного задающего устройства. Двенадцатиточечные приборы с трехпозиционным устройством и двадцатичетырехточечные — с двухпозиционным устройством комплектуют с двумя блоками дистанционного задающего устройства.

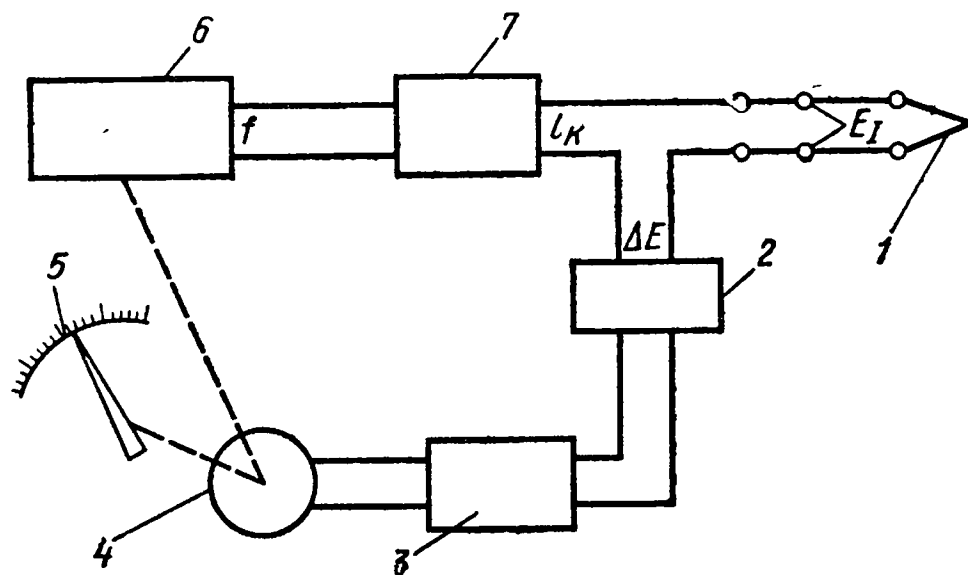


Рис. 72. Принципиальная схема потенциометра ЭППМ-О:

1 — термопара; 2 — вибропреобразователь; 3 — усилитель; 4 — реверсивный двигатель; 5 — указатель; 6 — компенсирующий струнный преобразователь ПС; 7 — преобразователь частоты в напряжение

показывающего потенциометра ЭППМ-О, основанная на компенсационном методе, дана на рис. 72. Габаритные размеры самопишущего прибора ЭПСМ: $200 \times 200 \times 465$ мм. Приборы могут быть оснащены позиционным регулирующим устройством.

Основные технические характеристики различных типов потенциометров и мостов приведены в табл. 50.

Проверку приборов в производственных условиях, а также их градуировку производят периодически в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

МИЛЛИВОЛЬТМЕТРЫ

Милливольтметры — приборы магнитоэлектрической системы, предназначенные для показаний, записи и регулирования температуры и других неэлектрических величин, преобразуемых с помощью датчиков в электрическое напряжение. Милливольтметры изготовляют в соответствии с ГОСТ 9736—68*. Технические характеристики пирометрических милливольтметров приведены в табл. 51.

Милливольтметры типа МПЩПР-54М являются показывающими щитовыми приборами с профильной шкалой. Габаритные размеры прибора $295 \times 125 \times 201$ мм. Милливольтметры типа МПЩР-53 применяют для измерения температуры в комплекте радиационного пирометра РАПИР с телескопом типа ТЕРА-50. По конструкции прибор МПЩР-53 аналогичен милливольтметру МПЩПР-54М. Он отличается лишь наличием корректора показаний (кольцевого реостата). На базе милливольтметра МПЩПР-54М выпускают регулирующий милливольтметр типа МР1-02М, имеющий фотоэлектрическое двухпозиционное устройство. Питание прибора осуществляется от сети 220 В, мощность 2,5 ВА.

Приборы МПЩПР-54М и МР1-02М заменяют милливольтметрами М-64 и МР-64-02 с аналогичными характеристиками. Габаритные размеры М-64: $220 \times 100 \times 240$ мм, габаритные размеры МР-64-02: $200 \times 100 \times 275$ мм.

Милливольтметры типа МСЩПР-00-18 представляют собой самопишущий щитовой прибор с профильной шкалой. Милливольтметр выпускают в модификациях: МСЩПР-01-18 — для измерения и записи температуры в одной точке; МСЩПР-02-18 для измерения, записи и двухпозиционного регулирования температуры в одной точке; МСЩПР-03-18 — для измерения, записи и трехпозиционного регулирования температуры в одной точке, МСЩПР-06-18 — для измерения и записи температуры в двух—шести точках.

51. Милливольтметры пирометрические

Тип	Пределы регулирования					Внешнее сопротивление, Ом	Основная погрешность показаний, %
	°С, при градуировке			%			
	ХК	ХА	ПП1	СО ₂	СО + Н ₂		
МПЩПР-54М	0 – 300 0 – 400	0 – 600 0 – 800	0 – 1600 —	0 – 20 —	0 – 2 —	0,6; 5; 15; 25	± 1,5
МПП-051	0 – 600	0 – 1100 0 – 1300	— —	— —	— —	0,6; 5; 15	± 1,0
МР1-02М	0 – 400 0 – 600	— —	— —	— —	— —	0,6; 5; 15	± 1,5
МПЩР-53 МСЩПР-010	— —	— —	— —	— —	— —	49 *2 56 *2	
МСЩПР-18	0 – 300 0 – 400	0 – 600 0 – 800	0 – 1300	0 – 20	0 – 2	0,6; 5; 15	± 1,0 *3
	0 – 600	0 – 1100 0 – 1300	0 – 1600	—	—	25 *1	

*1 Для градуировки ПП-1 внешнего сопротивления только 5 и 15 Ом.

*2 Полная величина регулирующего сопротивления.

*3 Основная погрешность записи ± 1,5%.

Для измерения, записи и регулирования СО₂ или СО + Н₂ применяются следующие модификации прибора: МСЩПР-11-18, МСЩПР-12-18, МСЩПР-13-18 и МСЩПР-16-18. Период записи 20 с. Запись осуществляется на диаграммной ленте с рабочей стороной 120 мм. Скорость движения диаграммной ленты 20, 40 и 80 мм/ч. Питание прибора от сети 220 или 127 В, 50 Гц. Максимальная потребляемая мощность 15 ВА.

Милливольтметр самопишущий регулирующий типа МСЩР-010 предназначен для работы в комплекте с радиационным пирометром РАПИР с телескопом ТЕРА-50. Конструкция прибора МСЩР-010 аналогична прибору типа МСЩР-00-18. Отличие заключается лишь в наличии корректора показаний, назначение которого соответствует назначению корректора в приборе МПЩР-53.

ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Пирометры излучения предназначены для контроля и регулирования температур 500—4000° С. Действие их основано на измерении яркости нагретого тела.

Оптические пирометры типа ОППИР-09 и ОППИР-ХОКЗ применяют для контроля при высокотемпературной пайке в интервале температур 600—2000° С [27].

Фотоэлектрический пирометр типа ФЭП-4 предназначен для автоматического контроля температуры неподвижных или движущихся изделий, нагретых до видимого свечения. Схема фотоэлектрического пирометра показана на рис. 73. Излучение от паяемого изделия 1 через линзу 2 объектива, диафрагму 3 и светофильтр 7 направляется вместе с излучением от эталонной лампы на фотоэлемент 5. Оба световых потока через отверстия 4 и 6 модулируются вибрационной заслонкой 11 с частотой 50 Гц в противофазе. Переменная составляющая фототока, пропорциональная разности световых потоков, усиливается, выпрямляется в усилителе 8 и подается на сетку выходного каскада 9, нагрузкой которого служит эталонная лампа накаливания 10. Последовательно с лампой, осуществляющей стабилизирующую отрицательную связь, включено комбинированное сопротивление. Падение напряжения на этом сопротивлении, пропорциональное току лампы, измеряется электронным потенциометром, градуированным в единицах температуры. Пирометр состоит из пяти отдельных блоков, электрически соединенных между собой: визирной головки,

силового блока, стабилизатора напряжения, электронного потенциометра и разделительного трансформатора.

Пирометры ФЭП-4 выпускают на следующие пределы измерения: 500—900; 600—1000; 600—1100; 800—1300; 850—1400; 900—1500; 950—1600; 1000—1700; 1100—1800; 1200—2000° С. К пирометру могут быть изготовлены двухшкальные приборы на следующие пределы измерения: 1200—2000 и 1400—2500; 1200—2000 и 1550—3000; 1200—2000 и 1700—3500; 1200—2000 и 1850—4000° С. Пирометр снабжают объективом одного из трех типов I, II и III с линзой с фокусным расстоянием

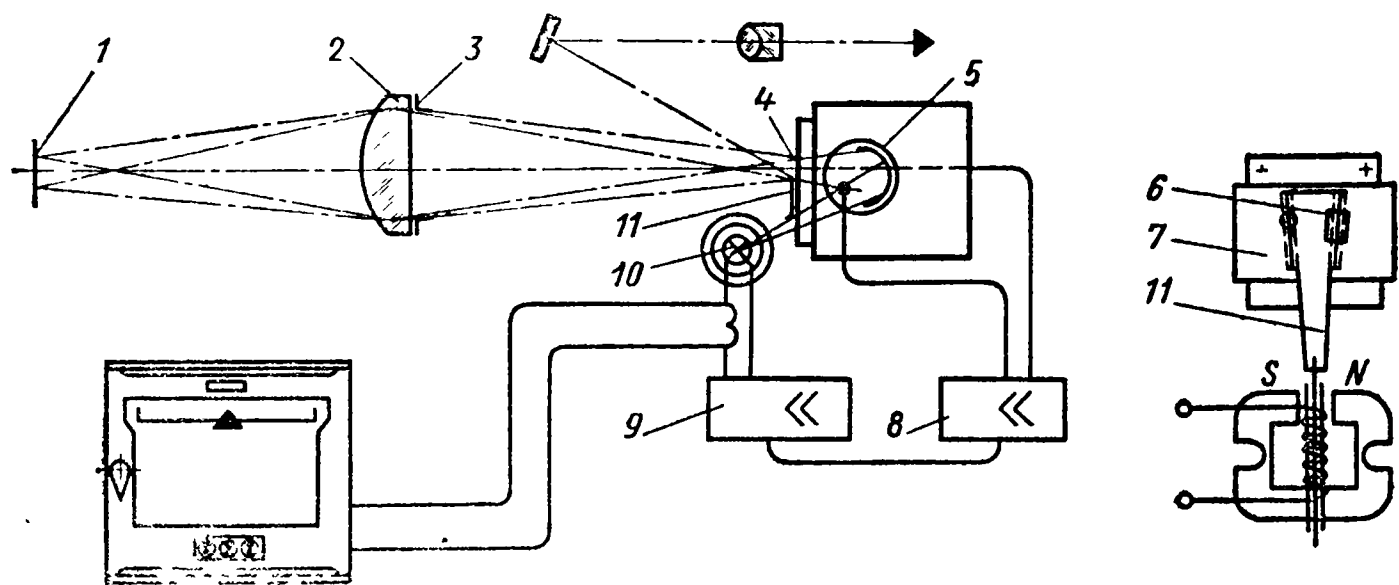


Рис. 73. Принцип действия фотоэлектрического пирометра ФЭП-4

100; 125; 154 или 200. Основная погрешность показаний пирометра не превышает $\pm 1\%$ от верхнего предела измерения при температуре до 2000° С и $\pm 1,5\%$ при температуре выше 2000° С.

Радиационный пирометр РАПИР предназначен для измерения температур в диапазоне 100—2500° С неподвижных или перемещающихся с небольшой скоростью объектов по их тепловому излучению. Комплект радиационного пирометра РАПИР состоит из телескопа типа ТЕРА-50, панели ПУЭС-64, защитной арматуры, соединительной коробки КС-20 и одного или двух вторичных приборов. Основной частью радиационного пирометра является телескоп ТЕРА-50 с термобатареей, преобразующей излучаемую поверхность нагретого тела энергию в т. э. д. с., которая измеряется вторичным прибором.

52. Телескоп ТЕРА-50

Градуйровка	Материал линзы	Диапазон температуры, °С	Основная погрешность, °С	Температура корпуса, °С	Дополнительная погрешность, °С
Р-5	Фтористый литий	100—500 400—500	± 8 ± 8	10	± 3
РК-15	Кварц	600—700 800—1100 1200—1500	± 10 ± 15 ± 20	20 40 60	0 $\pm 3,5$ ± 8
РС-20	К-8	900—1100 1200—2000	± 15 ± 20	80 100	± 13 ± 18
РС-25	К-5	1200—2000 2100—2200 2300—2500	± 20 ± 25 ± 30	—	—

Примечание. Тепловая инерция не превышает 4 с.

Характеристики телескопов ТЕРА-50 приведены в табл. 52, а типы, градуировка и пределы измерений вторичных приборов, которые могут с ними работать, — в табл. 53.

53. Пределы измерения и градуировки вторичных приборов радиационных гигрометров

Градуировка	Пределы измерений, °С	ЭПД	ЭП, ПЭД	ЭПП-16, ЭПР-16 *1	ЭППМ, ЭПСМ	МСЩР-010, МПЩР-53
РК-15	400—1100	+	+	-/+	-	-
	600—1200	+	+	-/+	+	-
	700—1400	+	+	-/+	+	-
	700—1500	-	+	-/+	+	-
РК-20	600—1200	-	+	-/+	+	-
	700—1400	+	+	+/+	+	-
	700—1500	-	+	-/+	+	-
	800—1600	-	+	-/+	+	-
	900—1800	+	+	-/+	+	-
	1200—2000	-	+	-/+	+	-
РС-20	900—1200	-	-	+/-	-	-
	900—1800	+	+	-/+	+	-
	1100—2000	+	-	-/-	-	-
	1200—2000	-	+	-/+	+	-
РС-25	1100—2000	-	-	+/-	-	-
	1200—2000	-	+	-/+	+	-
	1400—2500	+	-	+/-	-	-
	1500—2500	-	+	-/+	+	-
P ₂	700—1500	-	-	-/-	-	+
P ₃	900—1600	-	-	-/-	-	+
	900—1800	-	-	-/-	-	+
	1200—2000	-	-	-/-	-	+
P ₄	1200—2000	-	-	+/-	-	+
	1500—2500	-	-	-/-	-	+

*1 В числителе градуировка относится к приборам, выпускаемым заводом «Лентеплоприбор», в знаменателе — к приборам завода «Электроавтоматика».

*2 Градуировка относится только к прибору МСЩР-010.

Для защиты телескопа от повреждений применен комплект арматуры, в частности, сигнальное устройство, предохраняющее линзу телескопа от перегрева (при температуре 180° С происходит плавление предохранителя). Параллельно предохранителю включена сигнальная лампа (6,3 В), загорающаяся при его расплавлении.

ТЕРМОПАРЫ

Контрольно-измерительная и регулирующая аппаратура получает сигнал в виде т. э. д. с., возникающей в цепи датчика — термопаре. Технические характеристики, конструктивное оформление и т. э. д. с. различных термопар приведены в табл. 54 и 55.

54. Термопары

Тип	Пределы измерения, °С	Монтажная длина, мм	Условное давление, кгс/см ²	Конструктивное оформление	Материал защитной арматуры	Инерционность *1
Термопары ТПП (градуировка ПП-1)						
ТПП-11	1300	300, 320	Атмосферное	В сплошном чехле, без крепления	Фарфор	
Термопары ТХА (градуировка ХА) и ТХК (градуировка ХК)						
ТХА-11	800, 1000	500	Атмосферное	Коленчатое без штуцера	12Х18Н10Т	Большая
ТХА-VIII	800, 1000	160, 200, 320, 400, 800, 1250	6	С неподвижным штуцером, резьба М33×2	12Х18Н10Т, 15Х25Т	
ТХК-VIII	600		10		12Х18Н10Т	
ТХА-XIII	800	320, 500, 800, 1000, 1250, 1600	Атмосферное	Без штуцера с муфтой	12Х18Н10Т	
	1000				15Х25Т	
ТХК-XIII	600				12Х18Н10Т	
ТХА-V-XV ТХК-V-XV	600				120, 160, 220, 320	100
ТХА-146 ТХК-146	800 600	500, 800, 1000, 1250, 1600, 2000	Атмосферное	Без крепления	12Х18Н10Т	
ТХА-284 *2 ТХК-284	600	100, 160, 200, 320	250	С неподвижным штуцером, резьба М33×2	15Х25Т 12Х18Н10Т	Большая
ТХА-621 *3 ТХК-621	900 600	150, 200, 320, 400, 800, 1250	50			
ТХА-631 *3	900	500, 800, 1000, 1250, 1500, 2000, 2500, 3200	Атмосферное	Без штуцера, с передвижным фланцем	15Х25Т	
ТХК-631	600				12Х18Н10Т	
ТХКП-XVIII	400	100		Поверхностное	12Х18Н10Т	
ТХАП-551, ТХКП-551	600	170		Поверхностное с водо-защитной головкой	Двуокись титана или окись алюминия	
ТХКП-711	350	335, 610		Поверхностное	12Х18Н10Т или сталь 20	Не нормирована

*1 По инерционности термопары изготовляют в следующих модификациях: с ненормированной инерционностью (более 3,5 мин), с большой инерционностью (до 3,5 мин), средней (до 1 мин), малой (до 40 с).
*2 Выполняют виброустойчивыми.
*3 Выполняют двойными.

55. Термоэлектродвижущая сила (мВ) различных термопар в зависимости от температуры их рабочих концов

Темпе- ратуры рабочего конца, °С	ТПП (ПП-1)	ТПР (ПР-30/6)	ТХА (ХА)	ТХК (ХК)	Темпе- ратуры рабочего конца, °С	ТПП (ПП-1)	ТПР (ПР-30/6)	ТХА (ХА)	ТХК (ХК)
—50	—	—	—1,86	—3,11	900	8,428	4,019	37,37	—
—20	—0,109	—	—0,77	—1,27	1000	9,564	4,913	41,32	—
0	0	—	0	0	1100	10,732	5,876	45,16	—
100	0,643	—	4,10	6,95	1200	11,923	6,902	48,87	—
200	1,436	—	8,13	14,66	1300	13,129	7,982	52,43	—
300	2,314	0,456	12,21	22,91	1400	14,338	9,109	—	—
400	3,249	0,812	16,40	31,49	1500	15,537	10,274	—	—
500	4,218	1,268	20,65	40,16	1600	16,714	11,471	—	—
600	5,220	1,821	24,91	49,02	1700	—	12,691	—	—
700	6,256	2,467	29,15	57,77	1800	—	13,927	—	—
800	7,325	3,201	33,32	66,42					

Примечания: 1. Т. э. д. с. термопары ТНС, группы НС измеряется в пределах 0,38—13,39 мВ при изменении температуры от 300 до 1000°С.
2. В головке таблицы в скобках указана градуировка.

Термопары изготавливают в соответствии с ГОСТ 6616—74. Рабочий или «горячий» конец термопары образуется сваркой двух термоэлектродов, которые изолируют по всей длине. Свободные или «холодные» концы термопары присоединяют к милливольтметру или измерительной схеме. В связи с тем, что в производственных условиях температура свободных концов термопары обычно отличается от температуры, при которой составлялись градуировочные таблицы, в показания прибора необходимо вводить поправки.

Поправки можно вводить расчетным путем, методом переноса свободных концов термопары в зону постоянной температуры при помощи компенсационных проводов, введением в термоэлектрическую цепь компенсирующего напряжения, термостатированием свободных концов с помощью термостата. В автоматических потенциометрах компенсация обеспечивается автоматически.

Технические характеристики термопар с пределами измерения 300—1500°С приведены в табл. 56.

56. Термопары для измерения температуры 300—1500 °С

Тип	Градуировка	Материалы термоэлектродов	Пределы измерений, °С, при применении	
			длительном	кратковременном
ТПП	ПП-1	Платинородий (10% родия) — платина	20—1300	1600
ТПР	ПР-30/6	Платинородий (30% родия) — платинородий (6% родия)	300—1600	1800
ТХА	ХА	Хромель-алюмель	50—1000	1300
ТХК	ХК	Хромель-копель	50—600	800
ТНС	НС	Сплав НСК-А	300—1000	—

Примечания: 1. Верхний температурный предел длительного применения указан для проволок с диаметром не менее 0,5 мм для термопар с градуировками ПП-1 и ПР-30/6 и не менее 3,2 мм для термопар с градуировками ХА, ХК и НС (при измерении температуры в воздушной среде).
2. Положительным электродом в термопарах является электрод, материал которого в наименовании указан первым (например, хромель и т. д.).

Для измерения температур до 1800—2500° С применяют термопары вольфрам — молибден, вольфрам — рений, графит — карбид титана, графит — борид циркония с индивидуальной градуировкой.

При пайке изделий в атмосфере водорода применяют специальные вольфрам-рениевые термопары [24].

Для измерения температуры в среде сухого водорода используют термопары типа ТВР-0877; при измерении температуры в электропечах с увлажненным водородом с избыточным давлением до 40 мм вод. ст. применяют термопары типа ТВР-1338.

Техническая характеристика термопар ТВР-0877 и ТВР-1338

Пределы измерения температуры, °С	300—1800
Градуировка	ВР-10/20
Максимальная инерционность, с:	
ТВР-0877	10
ТВР-1338	180
Длина погружаемой части, мм	160; 200; 250; 320; 400; 500
Продолжительность работы, ч	4000
Масса термопары (с соединительными проводами), кг:	
ТВР-0877	3,0
ТВР-1338	3,5
Материал термоэлектродов:	
положительного	90% W, 10% Re
отрицательного	80% W, 20% Re
Диаметр термоэлектрода, мм	0,35

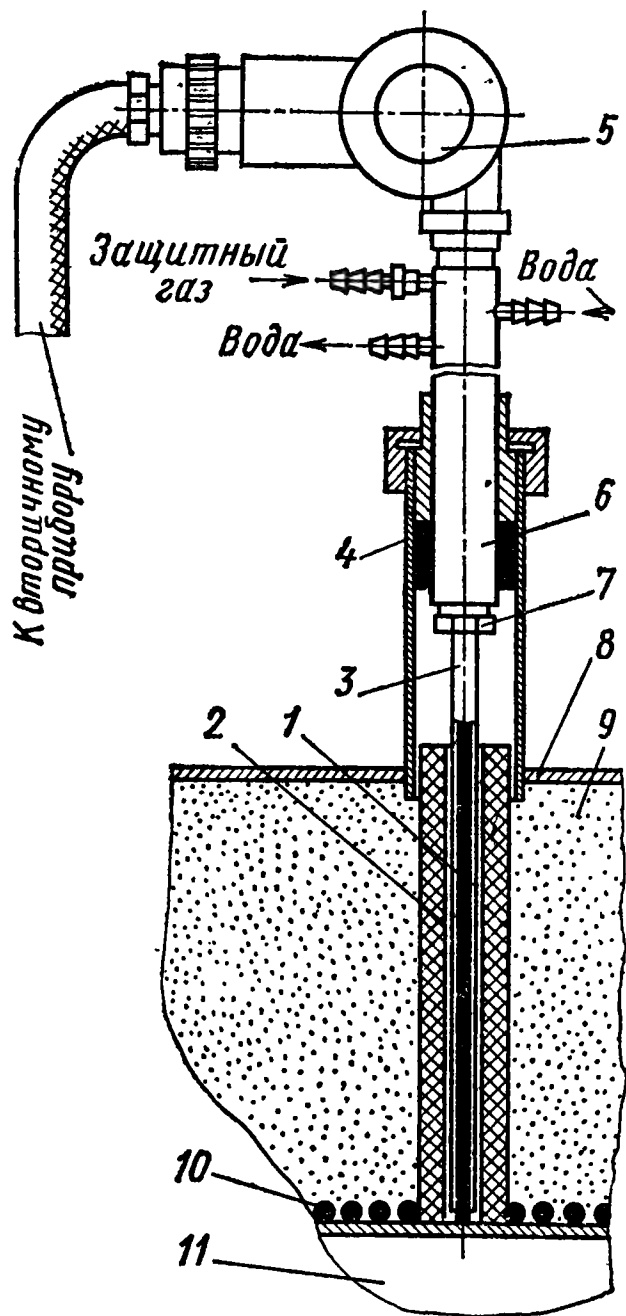


Рис. 74. Вольфрам-рениевая термопара:

1 — термоэлектроды; 2 — защитная трубка; 3 — термопара; 4 — уплотнения; 5 — головка термопары с запасной катушкой проволоки; 6 — водоохлаждаемый чехол; 7 — цанга; 8 — кожух печи; 9 — теплоизоляция; 10 — нагреватель; 11 — рабочее пространство печи

Допустимые отклонения т. э. д. с. термопары при температуре свободных концов в пределах измерений от т. э. д. с. по градуировочной таблице не превышают $\pm 1\%$. Изменение т. э. д. с. первоначального значения по градуировочной таблице за время работы термопары при 1800° С в течение 200 ч не превышает $\pm 1,5\%$.

Рабочий спай термопары после 200 ч работы при 1800° С возобновляется. Термопары выполнены герметичными со стороны головки. Конструктивное оформление вольфрам-рениевой термопары показано на рис. 74. Рабочий спай термопары сваривают графитовым электродом в среде спирта.

Для обеспечения герметичности термопары термоэлектроды пропущены через прокладку из вакуумной резины и для снятия возможных наводок помещены в защитную арматуру (трубу) из молибдена. При установке термопар на кожухе печи, имеющем температуру свыше 100° С, их арматура заключена в водоохлаждаемый чехол, выполненный из стали 12Х18Н10Т. На электропечи термопары устанавливают с сальниковым уплотнением.

По техническому уровню термопары ТВР-0877 и ТВР-1338 соответствуют лучшим образцам ведущих зарубежных фирм [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абаза С. А., Куликов Ф. В., Лехциер И. Р. Твердая пайка. М — Л., Госэнергоиздат, 1948, с. 53—58.
2. Автомат для припайки концов секций обмоток к коллекторам электрических машин. Авторское свидетельство № 130132. «Бюллетень изобретений», 1960, № 14, Авт.: Слонимский А. Б., Еремичев М. А., Никитин Г. М., Уголков Ф. И., Ильевский И. И.

3. Автоматизация пайки и термообработки зубцов для угольных комбайнов на Краснолучском машиностроительном заводе. «Автоматизация производства. Термическая обработка. Защита от коррозии», Труды ВНИИПТУГЛЕМАШа. М., Госгортехиздат, 1962, вып. 3, с. 3—12. Авт.: Морозов В. Д., Романов В. А., Садоминов Н. Т., Яновский И. И., Арцемович В. Н., Томбазиди Н. Х.

4. Вакуумная элеваторная электропечь. — «Электротермия», 1970, вып. 91, с. 4.
5. Винников И. З. Справочник молодого паяльщика. М., «Высшая школа», 1969, с. 96—100.
6. Газоприготовительные установки. — «Электротермия», 1969, вып. 86, с. 3—5.
7. Газоприготовительные установки. — «Электротермия», 1969, вып. 83, с. 3—5.
8. Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. В. Пайка деталей электровакуумных приборов. М., «Энергия», 1967, 288 с.
9. Гржимальский Л. Л., Расторгуев В. С., Селиванов А. Н. Установка для получения водорода высокой чистоты. «Пайка в машиностроении». Сб. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1967, № 2, с. 19—25.
10. Гуляев М. А., Ерюхин А. В. Измерение вакуума. М., Издательство стандартов, 1967, с. 5—6.
11. Есенберлин Р. Е. Пайка металлов в печах с газовой средой. М. — Л., Машгиз, 1958, с. 37—38.
12. Ильевский И. И., Лоцманов С. Н., Петрунин И. Е. О дальнейшем развитии пайки на предприятиях Мосгорсовнархоза. Сборник «Пайка металлов в производстве и перспективы ее развития». МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского. М., 1962, с. 78—82.
13. Камерные высокотемпературные электропечи. «Электротермия», 1964, вып. 36, с. 3, 5, 6.
14. Ковалевский Р. Е., Чекмаров А. А. Конструирование и технология вакуумноплотных паяных соединений. М., «Энергия», 1968, 208 с.
15. Кольцевые многопламенные горелки КГ для газопрессовой сварки поперечных стыков труб и круглой стали. Информационный листок ВНИИАВТОГЕНМАША, 1970, окт., 1953, № 41.
16. Красильникова И. Н. Термпары для измерения температур в среде сухого и влажного водорода. — «Электротермия», 1970, вып. 93, с. 7—8.
17. Куликов Ф. В., Лехциер И. Р. Твердая пайка. М. — Л., Госэнергоиздат, 1959, 174 с.
18. Куликов Ф. В., Лехциер И. Р. Основные методы мягкой и твердой пайки. М., Трудрезервиздат, 1958, с. 87—90.
19. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Пайка металлов. М., Машгиз, 1959, 243 с.
20. Лейканд М. С. Вакуумные электрические печи. М., «Энергия», 1968, 326 с.
21. Петрунин И. Е., Лоцманов С. Н., Николаев Г. А. Пайка металлов. М., «Металлургия», 1973, 281 с.
22. Максимихин Б. А. Пайка металлов в приборостроении. Л., ЦБТИ Ленсовнархоза, 1959, с. 69—71.
23. Общесоюзные нормы допустимых промышленных радиопомех. М., «Связьиздат», 1963.
24. Приборы и преобразователи для измерения температуры. В кн: Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины. Изд. 2-е. Л., «Машиностроение», 1968, с. 3—43. Авт.: Кошарский Б. Д., Безновская Т. Х., Бек В. А. и др.
25. Сварочное оборудование. Каталог-справочник. Ч. 2-я. Академия наук УССР, Институт электросварки им. Е. О. Патона. Киев, «Наукова думка», 1968, с. 242—248.
26. Справочник по сварке. В трех т. Под ред. Е. В. Соколова. Т. 1. М., Машгиз, 1960, 556 с.
27. Технологическое оборудование электровакуумного производства. М. — Л., Госэнергоиздат, 1962, с. 182—186. Авт.: Александрова А. Т., Бродский С. И., Сажин И. И., Щиренко Г. Н.
28. Типаж электротермического оборудования. ЦБТИ Госкомитета СМ СССР по автоматизации и машиностроению, 1961—1970, с. 125.
29. Хряпин В. Е., Лакедемонский А. В. Справочник паяльщика М., «Машиностроение», 1974, 327 с.
30. Шахтные вакуумные электропечи сопротивления. — «Электротермия», 1969, вып. 87, с. 3—4.
31. Шустов Б. Н., Шугаев В. А. Установка термокомпрессионной сварки металла с керамикой. — «Электронная промышленность», 1970, вып. 1, с. 111.
32. Щербинин В. П. Водородные и вакуумные элеваторные электропечи периодического действия. — «Электротермия», 1964, вып. 35, с. 3, 5.
33. Щербинин В. П. Двухколпаковая водородная электропечь СКБ-7001А. — «Электротермия», 1964, вып. 40, с. 19—21.
34. Электронно-лучевая пайка узла безугольного инжектора. — «Сварочное производство», 1971, № 4, с. 49—50. Авт.: Плетнев В. М., Рыжков Ф. Н., Дроздов М. Л., Стегнин Н. Г.
35. Электропечи с инфракрасным нагревом ОКБ-1152 и ОКБ-1153. — «Электротермия», вып. 43, 1965, с. 3—4.
36. Электропечи сопротивления. — «Электротехническая промышленность», серия «Электротермия», 1971, вып. 103, с. 3—4.
37. Электротермическое оборудование. Справочник. Под общей ред. Альтгаузена А. П., Смолянского М. Я. и Шевцова М. С. М., «Энергия», 1967, с. 45—53, 328—332.
38. Электропаяльники с высокоэффективным нагревом. В кн.: «Пайка в машиностроении». Сборник МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1967, № 2, с. 108—111. Авт.: Помазанов И. Н., Тихомиров П. Л.

Глава 6

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ
И СБОРКА ПОД ПАЙКУ

Для получения прочного соединения необходимо, чтобы место пайки было очищено от окалины и окисной пленки, а также от жиров, масел, пыли, грязи, краски и т. д. Классификация способов подготовки изделий к пайке показана на рис. 1.

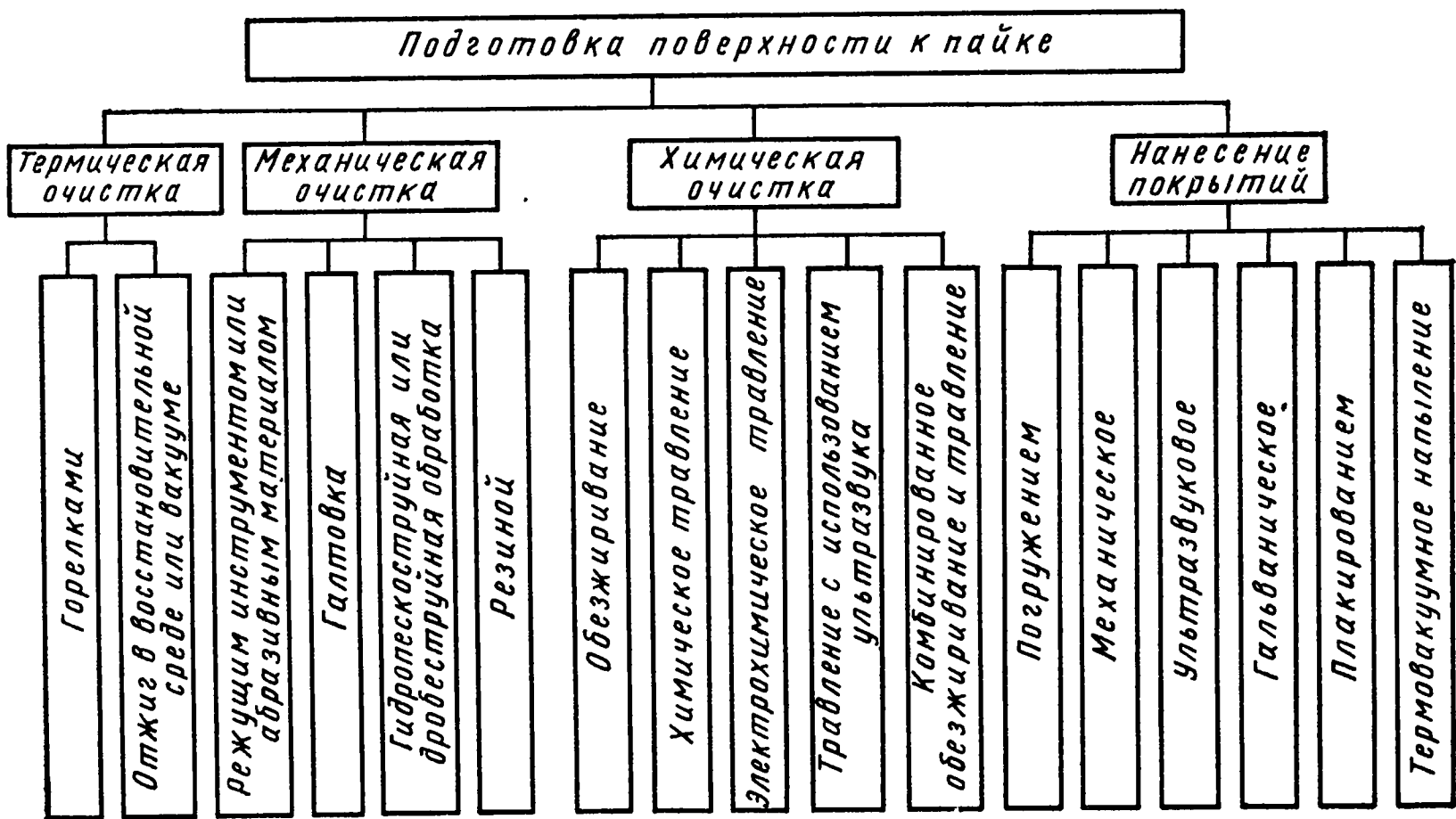


Рис. 1. Классификация способов подготовки изделий к пайке

ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПОД ПАЙКУ

Термическая очистка поверхности изделий. Очистку заготовки от грязи и краски можно производить керосино-кислородной или ацетилено-кислородной горелкой, дающей широкий факел пламени. Вследствие быстрого перемещения горелки металл почти не нагревается, а краска или другие посторонние вещества, имеющиеся на поверхности металла, успевают сгореть (требуется хорошая вентиляция). Этот же способ с последующей обработкой металлической щеткой применяют для очистки поверхности металла от окалины и изоляции (табл. 1).

Очистку деталей возможно производить отжигом в восстановительной среде или в вакууме.

Механическая очистка поверхностей изделий. Достоинство этого способа очистки в создании шероховатости поверхности, улучшающей капиллярное течение припоя. Недостаток — обычно не удается контролировать количество снятого основного металла. Механическая очистка при правильном применении гарантирует высокую надежность соединения.

Очистка напильниками, шаберами, шлифовальной шкуркой — способы малопродуктивные, их применяют в индивидуальном производстве для очистки от ржавчины, окалины и выравнивания поверхностей. После зачистки необходимо обработанную поверхность протереть ветошью, смоченной бензином.

1. Способы удаления изоляции с электропроводов

Изоляционный материал	Механический	Термический	Химический	Изоляционный материал	Механический	Термический	Химический
Асбест	1	3	3	Поливинилхлорид	1	2 **	3
Бумага	1	2 **	3	Полиуретан	2	1	1
Лак	2	1	1	Ролан *	1	3	3
Нейлон	1	2 **	3	Силиконовый каучук	1	3	3
Натуральный каучук	1	2 **	3	Солдериз *	2	1	2
Неопрен	1	2 **	3	Тефлон *	1	1	3
				Ткань	1	2 **	

Обозначения: 1 — обычно используемый способ; 2 — используемый только в особых случаях; 3 — обычно не используемый.

* Фирменное название.

** Используют обычно для отделения оболочки с участка, подлежащего зачистке; в остальном изоляционный материал удаляют механическим способом.

Очистка металлическими проволочными щетками — способ производительный и может быть использован в серийном и массовом производствах [16]. Рекомендуются для подготовки поверхностей алюминиевых и магниевых сплавов.

При механическом удалении изоляцию надрезают по окружности на требуемом расстоянии от свободного конца проводника, затем стягивают. Промышленность выпускает несколько типов автоматов для надрезки изоляции на проволоке.

Очистку деталей можно выполнять в специальном галтовочном барабане. Загруженные в него детали и куски абразива, перемещаясь, подвергаются очистке. Применяют для очистки мелких деталей и удаления заусенцев.

Гидропескоструйная и дробеструйная обработки — весьма эффективные и экономные методы.

Очистку поверхности обдувкой песком или дробью применяют при подготовке к пайке деталей с большой или сложной по форме поверхностью. Этот способ используют обычно для очистки деталей из железа и его сплавов; алюминиевые, магниевые, цинковые сплавы и олово таким способом не очищаются.

Для очистки используется кварцевый песок или абразивный порошок, осуществляют процесс в специальной гидропескоструйной камере (например, ГК-2).

Применяют следующие виды дроби (ГОСТ 11964—66*): чугуновую литую (ДЧЛ), колотую (ДЧК), стальную литую (ДСЛ), колотую (ДСК) и стальную рубленую из проволоки (ДСР).

Рекомендуемый химический состав дроби приведен в табл. 2.

2. Химический состав дроби (%)

Вид дроби	C	Si	Mn	P	S
				не более	
ДЧЛ, ДЧК	2,9—3,5	1,5—2,0	0,4—0,7	0,20	0,12
ДСЛ, ДСК, ДСР	0,7—0,9	2,3—2,6		0,09	0,07

Струя должна быть чистой и не оставлять на соединяемых поверхностях осадка, который будет препятствовать растеканию припоя. Желательно, чтобы частицы имели острые грани, оставляя поверхность слегка шероховатой. Тонкие детали не должны искривляться.

3. Материалы, применяемые при обезжиривании

Наименование материала		Хими- ческая формула	Моле- куляр- ный вес	Плот- ность, г/см ³	Растворимость в 100 г воды при температуре в °С, г	
химическое	торговое				20	100
Натр едкий	Каустическая сода	NaOH	40,0	2,16	Растворим	347
Натрий кремне- кислый	Жидкое стекло	Na ₂ SiO ₃	122,0	2,4	Растворим	Разлагается
Натрий угле- кислый	Сода кальцини- рованная	Na ₂ CO ₃	106,0	2,53	215	455
Натрий фосфор- нокислый	Тринатрий- фосфат	Na ₃ PO ₄	163,97	1,62	258	1570

4. Состав ванн для химического обезжиривания стали и чугуна

Компоненты	Составы ванн, г/л						
	1	2	3	4	5	6	7
Едкий натр	30—40	15—30	—	100—150	30—40	100—150	50—100
Углекислый натрий	40—50	10—25	—	—	—	30—50	—
Тринатрийфосфат	3—5	10—35	50—65	30—40	70—80	—	30—40
Эмульгатор ОП-7	0,5	0,5	—	—	20—30	—	—
Жидкое стекло	—	10—25	30—50	—	5—8	3—5	—
Контакт Петрова	—	—	—	20—25	—	—	40—50

5. Состав ванн для химического обезжиривания меди и ее сплавов

Компоненты	Содержание, г/л					
	1	2	3	4	5	6
Едкий натр	5—10	40—50	—	30—50	80—100	8—10
Углекислый натрий	15—30	40—50	20—25	20—25	—	8—10
Тринатрийфосфат	30—60	30—40	30—35	—	—	15—20
Эмульгатор ОП-7	0,5	—	5—10	3—5	—	—
Жидкое стекло	—	—	5—10	5—10	10—15	2—3
Контакт Петрова	—	15—20	—	—	—	5—10

6. Состав ванн для химического обезжиривания алюминия и его сплавов

Компоненты	Содержание, г/л				
	1	2	3	4	5
Углекислый натрий	40—70	25—30	20—25	40—50	—
Тринатрийфосфат	10—20	25—30	20—25	3—5	50—60
Эмульгатор ОП-7	—	—	5—10	—	—
Жидкое стекло	20—30	—	—	20—30	30
Контакт Петрова	—	10—12	—	10—15	—
Едкий натр	—	—	—	—	10

Не рекомендуется применять сферическую металлическую дробь любого рода, поскольку эти материалы используют преимущественно для нагартовки, а не для получения шероховатой поверхности.

Многие ответственные детали очищают от загрязнений резиной. Эта операция обходится очень дорого, и ее нельзя рекомендовать для повседневной практики. Применяемая резина должна обладать умеренной абразивной способностью по отношению к основному металлу и в то же время быть достаточно твердой и прочной.

Для хорошего смачивания поверхности припоями не следует применять поверхность с высотой неровностей менее 10—15 мкм, при сборке деталей с прессовой посадкой высота неровностей должна быть 80—150 мкм, что достигают накаткой.

Шероховатость поверхности определяют с помощью профилометров или профилографов [4].

Химическая очистка поверхностей изделий. Очистку деталей осуществляют обезжириванием, травлением, промывкой в воде. Выбор способа определяется характером загрязнений, свойствами материала и конфигурацией деталей. Обработка поверхности деталей химическим путем может сопровождаться отрицательными явлениями, например, наводороживанием и т. п., поэтому рекомендации по составам и режимам обработки основываются преимущественно на производственном опыте.

Обезжиривание поверхности применяют для очистки деталей от остатков смазок и других жировых загрязнений. Животные и растительные жиры удаляют обычно химическим или электрохимическим способом в растворах щелочей и некоторых солей, минеральные масла — промывкой в органических растворителях.

Способы химического обезжиривания поверхностей перед пайкой и составы растворов приведены в табл. 3—12 [19].

7. Режим обезжиривания деталей из алюминия и его сплавов

Операция	Среда	Температура, °C	Время выдержки, с
Обезжиривание химическое	Щелочной раствор	60—70	3—5
Промывка (двукратная)	Проточная горячая вода	80—90	10—15
Промывка	Проточная холодная вода	18—20	10
Сушка	Горячий воздух	80—90	180—240

8. Состав ванн для химического обезжиривания магния и его сплавов

Компоненты	Содержание, г/л				
	1	2	3	4	5
Тринатрийфосфат	40—60	40—60	—	20—30	—
Едкий натр	10—25	10—25	80—100	20—30	10—15
Жидкое стекло	20—30	20—30	5—15	—	—
Эмульгатор ОП-7	—	5—7	—	1—2	1—2
Углекислый натрий	—	—	—	—	20—25

9. Режим обезжиривания деталей из магния и его сплавов

Операция	Среда	Температура, °C	Время выдержки, с
Обезжиривание химическое	Щелочной раствор	50—60	240—300
Промывка	Проточная горячая вода	80—90	10—15
Промывка	Проточная холодная вода	18—20	10—15
Сушка	Горячий воздух	80—90	180—240

10. Состав ванны и режим химического обезжиривания никеля и его сплавов

Компоненты	Содержание, г/л	Температура, °С	Время выдержки, мин
Едкий натр	10—20	60—70	3—5
Углекислый натрий	25—30		
Жидкое стекло	3—5		

11. Состав ванны и режим химического обезжиривания свинца и его сплавов

Компоненты	Содержание, г/л	Температура, °С	Время выдержки, мин
Едкий натр	5—10	60—70	3—5
Тринатрийфосфат	100		
Жидкое стекло	2—3		

Простейшим и весьма эффективным способом обезжиривания в штучном и мелко-серийном производстве паяных изделий является обработка этих изделий *венской известью*, представляющей собой смесь СаО и MgO, получаемую в результате обжига доломита (CaCO₃·MgCO₃).

12. Состав ванны и режим химического обезжиривания керамических деталей

Компоненты	Содержание, г/л	Температура, °С	Время выдержки, мин
Углекислый натрий	20	50—60	5—10
Тринатрийфосфат	10		
Эмульгатор ОП-7	3		

В условиях серийного и массового производства чаще применяют *щелочные растворы*. Не рекомендуется обезжиривать в растворах щелочей детали из металлов, химически реагирующих со щелочами, в частности, из цинка, алюминия и свинца, или имеющие на поверхности места, облуженные оловянно-свинцовым припоем. В зависимости от загрязнений температуру растворов, приведенных в табл. 4—6, поддерживают в пределах 60—90 °С с продолжительностью обезжиривания 5—30 мин.

Консервирующие слои масел с изделий со сложными поверхностями, с внутренними полостями и глубокими отверстиями удаляют при помощи *органических растворителей* (табл. 13) [19].

Органические растворители не могут быть применены для обезжиривания деталей, поверхность которых покрыта влагой, шлифовальными веществами.

Бензин хорошо растворяет жиры и масла. Он не взаимодействует с металлами, не разлагается под действием света и тепла, но применение его ограничено из-за легкой воспламеняемости и опасности образования взрывчатых смесей с воздухом.

13. Органические растворители

Название	Химическая формула	Молекулярный вес	Плотность, г/см³	Температура кипения, °С	Растворимость в 100 г воды, г
Ацетон	(CH ₃) ₂ CO	58,08	0,79	56	—
Бензол	C ₆ H ₆	78,12	0,87	80,2	0,08
Четыреххлористый углерод	CCl ₄	153,84	1,59	> 150 * возгон.	95
Толуол	C ₆ H ₅ OH ₃	92,14	0,86	110	0,05
Скипидар	—	—	0,86	160	Не- растворим
Бензин	—	—	0,70	70—120	
Уайт-спирит	—	—	0,78	140—200	
Дихлорэтан	CH ₂ Cl = CH ₂ Cl	98,97	1,25	83,7	
Трихлорэтан	CHCl = CCl ₂	131,40	1,46	87	0,1
Метиловый спирт	CH ₃ OH	32,04	0,79	64	∞
Этиловый спирт	C ₂ H ₅ OH	46,07	0,78	78	∞
Трихлорэтилен	ClCH · CCl ₂	131,40	1,446	87,2	0,1

* Возгоняется.

Парами ацетона пользуются для очистки деталей из алюминированных металлов. В условиях мелкосерийного производства обезжиривание производят вручную. Корзины с деталями последовательно погружают в три ванны с растворителями и встряхивают. Обезжиренные детали промывают водой и сушат в сушильной камере.

Схема установки для обезжиривания в горючих растворителях показана на рис. 2. В крупносерийном и массовом производстве детали очищают от жира дихлорэтаном, трихлорэтаном, трихлорэтиленом и др. Они хорошо растворяют жиры и легко поддаются регенерации, что значительно удешевляет процесс, но из-за своей ядовитости требуют применения специального оборудования.

Трихлорэтилен хорошо растворяет большинство смазок и органических соединений, не воспламеняется и позволяет обезжиривать изделия при повышенной температуре, чем улучшается и ускоряется очистка. Однако он склонен к разложению под действием света, особенно при перегреве. Разложение трихлорэтилена сопровождается выделением соляной кислоты и фосгена, вредного для работающих. Разложению способствуют алюминий, магний, их сплавы и алюминированные металлы. Признаком начала разложения является кислая реакция трихлорэтилена, поэтому на участках обезжиривания регулярно производится контроль его кислотности с помощью раствора лакмуса. С целью повышения химической устойчивости трихлорэтилена в него при изготовлении или перед использованием вводят стабилизатор (уротропин, диэтиламин).

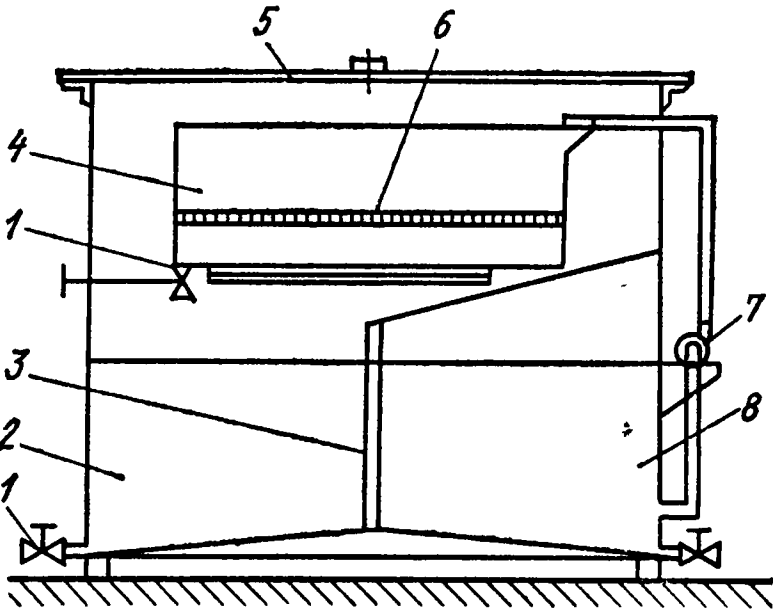


Рис. 2. Схема установки для обезжиривания в горючем растворителе:

1 — выпуск; 2 — камера для загрязненного растворителя; 3 — фильтр; 4 — бак для обезжиривания; 5 — крышка; 6 — решетка; 7 — насос; 8 — камера для чистого растворителя

При регенерации нельзя допускать нагрева трихлорэтилена выше 120° С. Детали обезжиривают несколькими способами: погружением изделия в растворитель, парами растворителя и комбинированным способом.

Методом погружения (рис. 3) обрабатывают обычно детали тонкого сечения и сильно загрязненные маслом и полировальными пастами. В парах растворителя (рис. 4) обрабатывают крупногабаритные и малозагрязненные изделия. Обезжириваемые холодные детали подвешивают над кипящим растворителем. Пары растворителя конденсируются на поверхности холодных деталей и снова стекают в кипящую жидкость.

Комбинированный метод обезжиривания погружением и в парах растворителя (рис. 5) дает качественные результаты.

Более совершенным является способ комбинированного обезжиривания в парах, погружением и обрызгиванием (рис. 6). Иногда для обезжиривания применяют эмульсии на органических растворителях (табл. 14) [19].

14. Эмульсии для обезжиривания

Компоненты	Состав, %	Компоненты	Состав, %
Дистиллированная жирная коксовая кислота	12	Мыльный раствор триэтаноламинолота	25
Масляная кислота	22	Трихлорэтилен	75
Триэтаноламин	17	Керосин	2
Диэтиленгликольмонобутилен	15	Эмульгатор ОП-7	1
Углеводород (температура кипения > 180 °С)	20	Вода	97
Вода	14	Трихлорэтилен	80
		Мыльный раствор	20

Эффективность этого способа можно значительно повысить с помощью ультразвука. Перед пайкой очищающие растворы должны быть тщательно удалены с поверхности деталей водой или паром. Если применяется вода, предпочтительно брать

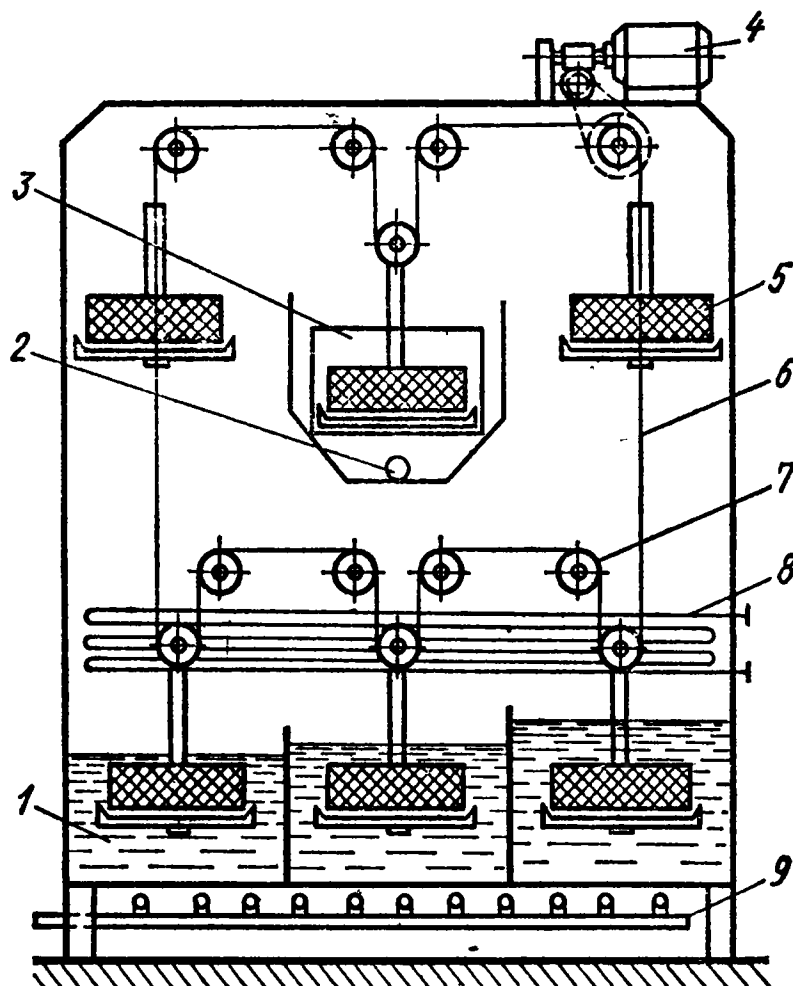


Рис. 3. Схема автоматической установки для обезжиривания погружением:

1 — камеры обезжиривания; 2 — вытяжное отверстие; 3 — загрузочное отверстие; 4 — привод; 5 — корзина; 6 — цепь; 7 — ролик (блок); 8 — охлаждающий змеевик; 9 — подогреватель

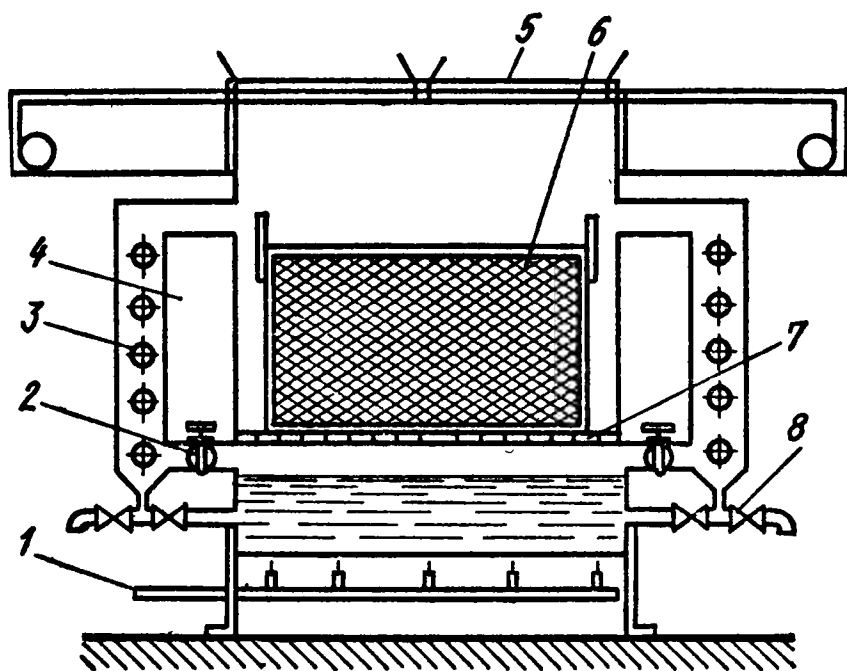


Рис. 4. Схема установки для обезжиривания в парах растворителя:

1 — подогреватель; 2 — клапан; 3 — охлаждающий змеевик; 4 — бак; 5 — двухстворчатая крышка; 6 — корзина; 7 — решетка; 8 — вентиль

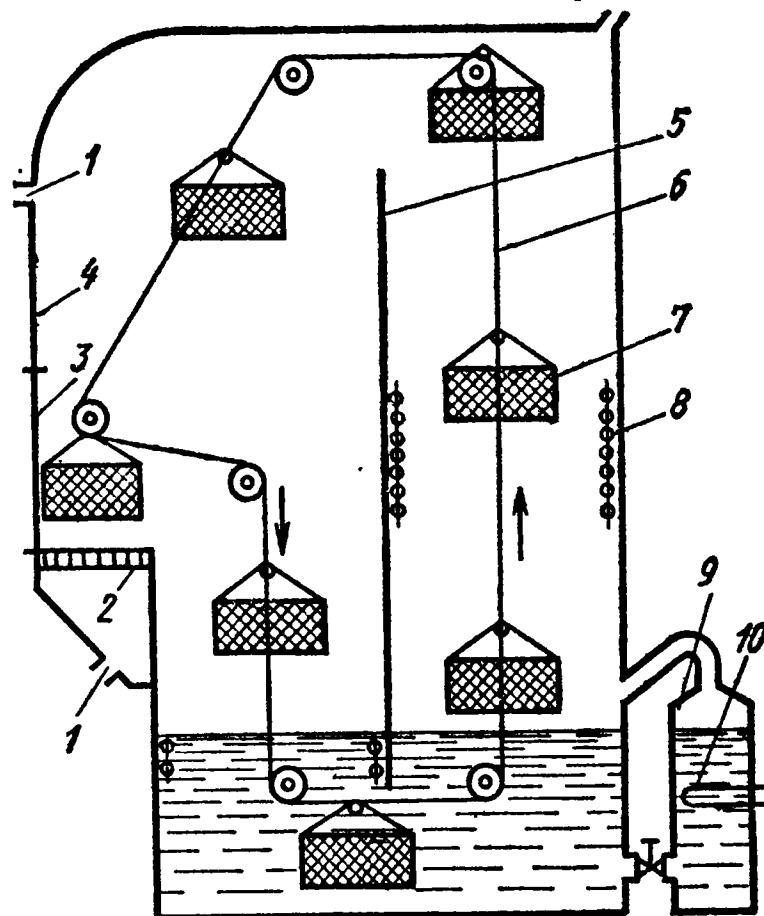


Рис. 5. Схема автоматической установки для обезжиривания в парах растворителя и погружением:

1 — вытяжное отверстие; 2 — решетка; 3 — операционное отверстие; 4 — бак для обезжиривания; 5 — перегородка; 6 — цепь; 7 — корзина; 8 — охлаждающий змеевик; 9 — испаритель; 10 — змеевик для нагрева

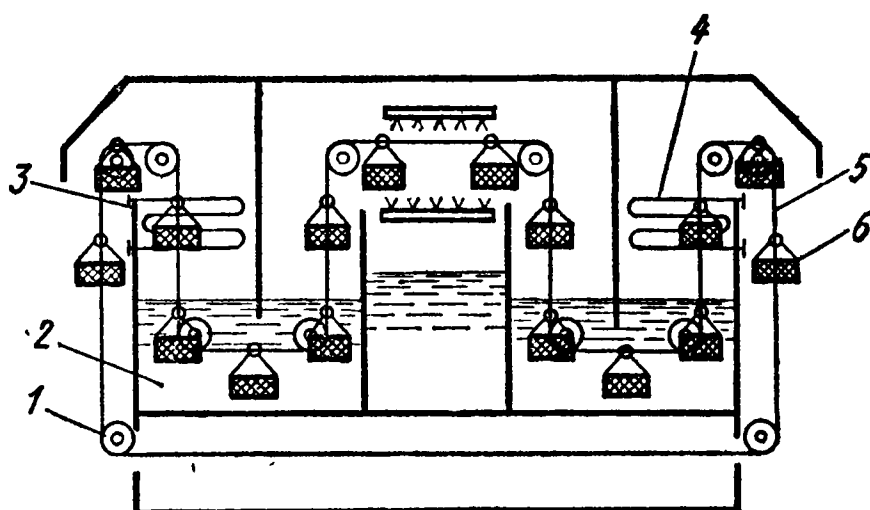


Рис. 6. Схема установки для комбинированного обезжиривания в парах, погружением и обрызгиванием:

1 — блок; 2 — бак для обезжиривания; 3 — камера для обрызгивания; 4 — охлаждающий змеевик; 5 — цепь; 6 — корзина

мягкую воду, так как жесткая оставляет осадки, которые могут препятствовать пайке.

Обезжиривание в водных растворах щелочей отличается высокой эффективностью, низкой стоимостью и простотой. Недостатками его являются необходимость подогрева растворов, трудность или невозможность их регенерации, а также взаимодействие их с некоторыми металлами [3].

15. Состав электролитов для электрохимического обезжиривания сталей

Компоненты	Содержание, г/л				
	1	2	3	4	5
Едкий натр	80–90	30–40	70–80	30–40	25–30
Тринатрийфосфат	—	10–15	15–20	—	50–60
Углекислый натрий	60–80	20–30	20–25	50–75	20–30
Жидкое стекло	—	8–10	3–5	—	5–8
Цианистый натрий	40	—	—	—	—
Эмульгатор ОП-7	—	—	—	3–5	1–2
Пеногаситель (силоксин)	—	—	—	—	0,01–0,03

16. Состав электролитов для электрохимического обезжиривания меди и ее сплавов

Компоненты	Содержание, г/л						
	1	2	3	4	5	6	7
Едкий натр	13–16	35–40	10	—	—	—	—
Углекислый натрий	8–10	20–25	30	5–10	—	30	5–10
Тринатрийфосфат	3–5	20–25	15	30–40	10–20	50	20–30
Цианистый натрий	1–2	—	10	—	—	—	—
Жидкое стекло	—	3–5	—	3–5	10–20	—	—
Жидкое мыло	—	—	—	—	—	—	5–10

17. Состав электролитов для электрохимического обезжиривания алюминия и его сплавов

Компоненты	Содержание, г/л	
	1	2
Углекислый натрий	20	6
Тринатрийфосфат . .	20	6

18. Состав электролитов для электрохимического обезжиривания магния и его сплавов

Компоненты	Содержание, г/л	
	1	2
Тринатрийфосфат . .	15–30	—
Углекислый натрий	20–30	10–15
Едкий натр	—	15–20

19. Состав электролитов для электрохимического обезжиривания деталей из цинкового сплава

Компоненты	Содержание, г/л		
	1	2	3
Тринатрийфосфат . .	45–50	—	10–15
Цианистый натрий	10–15	—	—
Жидкое стекло . . .	15–20	—	15–20
Пирофосфорнокис- лый натрий	—	50–55	—
Едкий натр	—	—	10–15
Углекислый натрий	—	—	10–15

Обезжиривание в щелочах требует сравнительно большого расхода растворов. Электрохимический способ ускоряет процесс и сокращает расход растворов. Однако он недостаточно эффективен применительно к изделиям сложной конфигурации. Для обработки таких деталей обычно применяют последовательно химический и электрохимический способы.

Электрохимическое обезжиривание производят с применением постоянного тока. В зависимости от того, к какому полюсу подключено изделие, различают катодное, анодное и смешанное обезжиривание. Скорость очистки при катодном обезжиривании значительно выше, чем при анодном, но оно не всегда применимо. В частности, при катодном обезжиривании углеродистых сталей происходит наводороживание их, что приводит к снижению пластических свойств металла.

Электрохимическое обезжиривание применяют для изделий из стали, меди и ее сплавов, алюминия и его сплавов.

Составы электролитов и режимы электрохимического обезжиривания приведены в табл. 15—20 [19].

20. Режимы электрохимического обезжиривания деталей *

Операция	Среда	Температура ванны, °С	Плотность тока, А/дм²	Напряжение, В	Время выдержки, мин
Обезжиривание электрохимическое	Щелочной раствор	60—90	2—10	6—12	2—10
Двукратная промывка	Проточная горячая вода	80—90	—	—	1
Сушка	Горячий воздух	50—80	—	—	5—10

* Параметры технологического процесса уточняют в зависимости от обрабатываемого сплава и степени загрязнения.

Очистка ультразвуком от нерастворимых загрязнений, попавших в узкие щели, каналы, отверстия, является единственно возможным способом. Применяется также для мелких деталей при удалении жиров, ржавчины, окалины, окисных пленок, остатков абразивных и полировочных паст.

Ультразвуковое обезжиривание не только дает самое высокое качество очистки, но в десятки раз ускоряет и упрощает процесс и примерно в 2 раза дешевле других видов очистки.

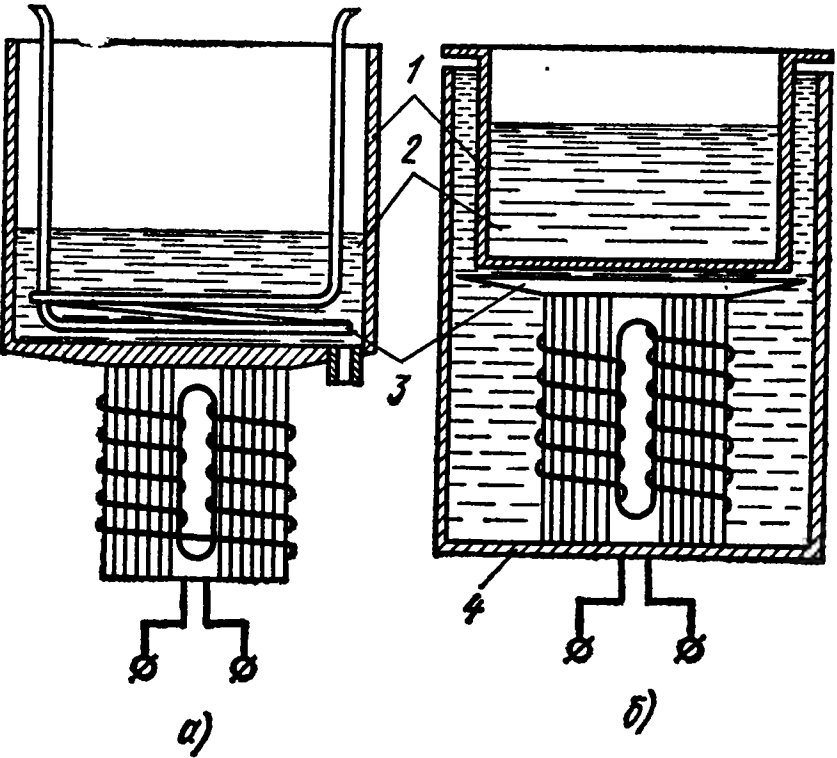


Рис. 7. Схемы ванн для ультразвукового обезжиривания:

а — для крупных деталей; б — для мелких деталей; 1 — ванна; 2 — моющий раствор; 3 — магнитострикционный преобразователь; 4 — бак с водой или трансформаторным маслом

Схемы ванн для ультразвукового обезжиривания показаны на рис. 7 [18]. Краткая характеристика ультразвуковых ванн приведена в табл. 21.

21. Ультразвуковые ванны типа УЗВ

Параметры	УЗВ-15	УЗВ-16	УЗВ-17	УЗВ-18
Количество встроенных преобразователей	1	2	3	4
Рабочая емкость ванн, л	35	80	120	150
Полезная площадь зеркала ванны, мм²	310××390	370××670	370××960	370××1250
Максимальная потребляемая мощность, кВт	2,5	5,0	7,5	10,0

Большинство промышленных ультразвуковых установок работает на частоте 20—40 кГц. Применение таких низкочастотных ультразвуковых полей объясняется их значительной эффективностью при обезжиривании, а также тем, что они менее направлены и облучают большую площадь, чем высокочастотные поля. К недостаткам обработки низкочастотным ультразвуком относится слышимый кавитационный шум.

Моющая жидкость, применяемая при обезжиривании, должна быстро удалять загрязнения, но не изменять поверхности и размеров деталей и не портить стенок ванн. Ультразвуковое обезжиривание облегчается, если в качестве моющей среды берут смачивающее вещество.

Для повышения смачивающей способности воды в нее добавляют мыло или поверхностно-активные вещества (СП-7, ОП-10 и др.), а для омыления жировых загрязнений — щелочи (тринатрийфосфат, едкий натр, углекислый натр и др.). Иногда в качестве моющих жидкостей используют органические растворители. Составы некоторых моющих сред приведены в табл. 22 [3].

22. Составы моющих сред при ультразвуковом обезжиривании

Состав	Кон- цен- тра- ция, г/л	Очищаемые металлы	Состав	Кон- цен- тра- ция, г/л	Очищаемые металлы
Едкий натр Хромпик калиевый .	15 1,5	Сталь *	Силикат натрия . . . Сода Тринатрийфосфат . .	10 4 6	Медь, цинк, алюминий
Едкий натр Сода Тринатрийфосфат . . ОП-7	5—10 15—30 30—60 3—5	Сталь, медь, латунь	Тринатрийфосфат . . ОП-7	5—10 3	Алюминий, цинк
			Сода Метасиликат натрия	10 10	Алюминий, цинк
Сода Тринатрийфосфат . . Хромпик калиевый . ОП-7	3—5 3—5 0,5—0,6 3—5	Латунь	Тринатрийфосфат . . Сода ОП-7	5 5 3	Магний и его сплавы
* Очистка с одновременным пассивированием.					

Оптимальная температура обезжиривания определяется составом моющей среды и видом загрязнений. Наилучшие результаты по ультразвуковому обезжириванию в чистой воде и воде с добавками моющих веществ получаются при температуре ванны 50—60° С.

Для органических растворителей температура обезжиривания должна быть ниже температуры кипения.

Для щелочных и кислых сред температура раствора не должна превышать 60° С. Детали в ультразвуковой ванне крепят обычно с помощью сеток-контейнеров. После обработки ультразвуком изделия необходимо промывать в чистой воде, а раствор очищать от примесей.

Качество обезжиривания поверхности деталей контролируют с помощью радиоактивных изотопов, фотометрическим способом, а также способом, основанным на изменении интенсивности флуоресценции при облучении ультрафиолетовыми лучами обезжиренных и необезжиренных поверхностей [3].

Х и м и ч е с к о е т р а в л е н и е. Имеющиеся на поверхности изделий пленки окислов и других соединений при обезжиривании не удаляются. Наличие этих пленок препятствует образованию прочного соединения припоя с паяемым металлом. Поэтому изделия перед пайкой после обезжиривания подвергают травлению в растворах кислот, щелочей и солей.

Очистка химическим травлением и полированием основана на способности кислот и щелочей растворять окислы некоторых металлов. Время выдержки в растворе определяется состоянием поверхности и требованиями сохранения точности размеров деталей. Характеристики кислот, используемых при травлении, приведены в табл. 23 [19].

23. Кислоты, применяемые при травлении металлов

Кислота	ГОСТ	Химическая формула	Молекулярный вес	Плотность, г/см³	Максимальная концентрация, %
Азотная	701—68	HNO ₃	63,02	1,53	100
Серная	2184—67	H ₂ SO ₄	98,07	1,84	100
Соляная	857—69	HCl	36,47	1,19	40
Ортофосфорная	10678—63*	H ₃ PO ₄	98,06	1,88	100
Плавиковая	2567—73	HF	20,01	1,15	50

Во избежание перетравливания в травильный раствор добавляют ингибиторы (КС, «Уникол», МН, ПБ-5, «Антра»), которые замедляют растворение металла в кислотах, способствуют получению светлой поверхности деталей и предохраняют металл от вредного действия выделяющегося при травлении водорода.

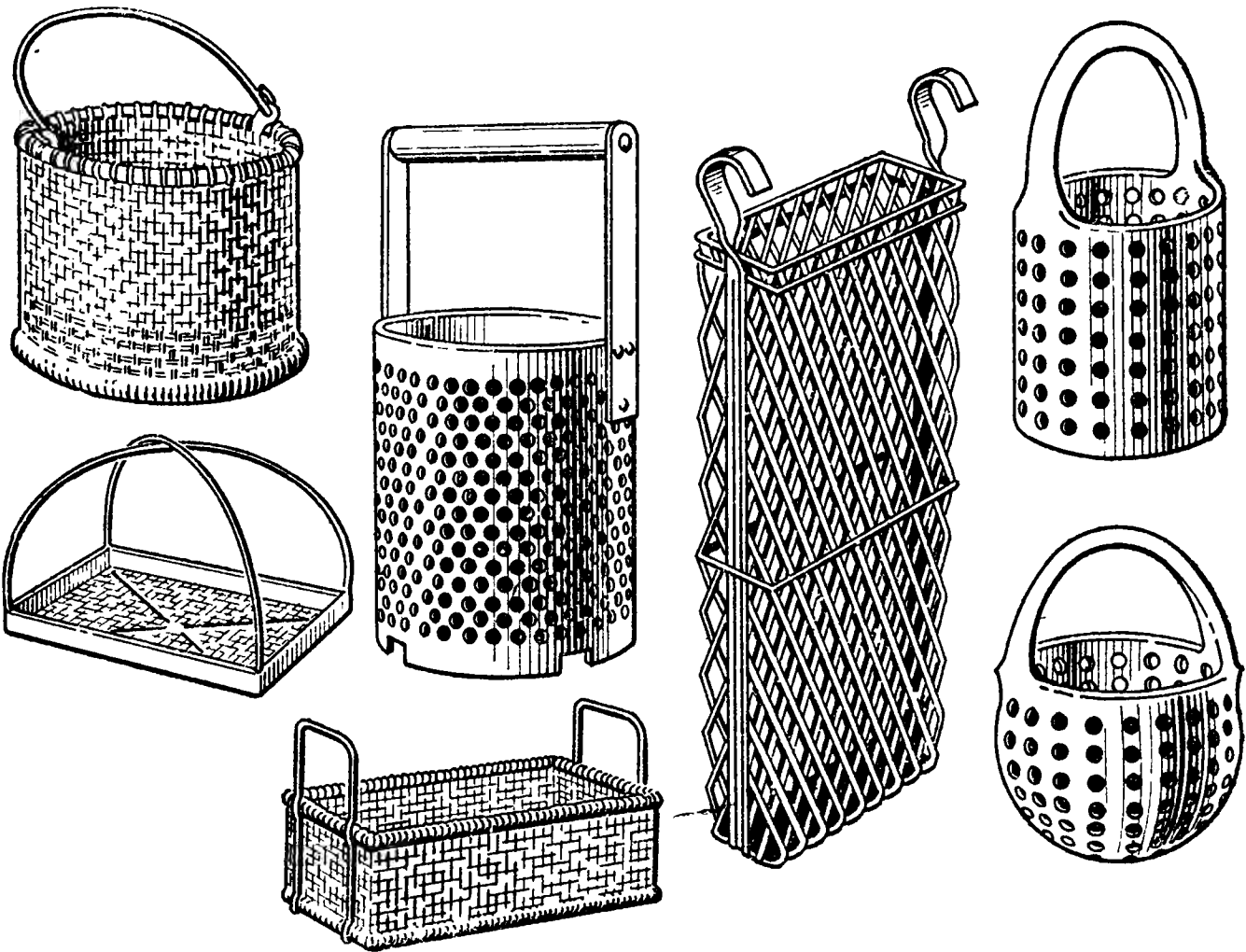


Рис. 8. Приспособления для травления мелких деталей

Составы растворов и режимы работы ванн для химического травления различных металлов и сплавов приведены в табл. 24—35 [3, 8, 15, 17, 19].

Для операций травления используют сосуды и ванны из кислотоупорных материалов (например, керамики, фарфора, кварцевого стекла) и металлические сосуды и ванны, футерованные винипластом, резиной и т. п. Мелкие детали погружают в ванну в корзинах или лотках (рис. 8).

Наряду с поверхностным травлением в ряде случаев может быть использовано глубокое травление места пайки для создания шероховатой поверхности, что в несколько раз увеличивает площадь сцепления основного металла с припоем. Глубокое травление стали осуществляется 25—30%-ным раствором соляной кислоты. Для нержавеющей сталей, содержащих Cr и Mo, травление производится 10%-ным водным раствором царской водки при 80° С (такой раствор содержит примерно 3% азотной, 7% соляной кислоты и 90% воды).

24. Состав и режим работы ванн для химического травления углеродистых и нержавеющей сталей, алюминия, серебра, золота, тантала и их сплавов

Компоненты	Содержание, г/л	Темпера- тура, °С	Назначение
Углеродистые стали			
Серная кислота Соляная кислота Присадка КС	75 125 3	30—40	Снятие толстого слоя ока- лины
Серная кислота Соляная кислота Присадка МН	27 10 0,2	30—40	Для сталей с окалиной
Серная кислота Соляная кислота Присадка КС	10 15 3		
Соляная кислота Азотная кислота Фосфорная кислота	190 90 50	50—60	Для сталей с легким на- летом ржавчины
Серная кислота Присадка КС	90 1	18—40	Для сталей без окалины
Серная кислота Присадка КС Натрий хлористый	150 2 4	18—60	
Серная кислота Соляная кислота Присадка КС	18 10 0,5	40—60	
Соляная кислота Ингибитор травления	50*1 —	18—25	Снятие окалины железа и стали. Быстродействующий. Удобен для полированной стали
Серная кислота Ингибитор травления	6,25*1	18—80	Для железа и стали. Де- шевле предыдущего, но дей- ствует медленнее
Щавелевая кислота Перекись водорода Вода дистиллированная	8*2 16*3 160*3	50—60	Для низкоуглеродистых сталей. Полировка в тече- ние 1—2 мин
Нержавеющие стали			
Серная кислота	10*1	80	Только для ослабления толстого слоя окалины; по- следующая обработка одним из приводимых ниже раство- ров
Серная кислота Соляная кислота	10*1	55—60	

Продолжение табл. 24

Компоненты	Содержание, г/л	Темпера- тура, °С	Назначение
Азотная кислота Плавиковая кислота Ингибитор	20 30	50—65	Удаление окалины
Серная кислота Плавиковая кислота Хромовая кислота Ингибитор	6.25 6.25 6*4	Комнат- ная или несколько выше	
Соляная кислота Азотная кислота Ингибитор	25 5		
Алюминий и его сплавы			Удаление окислов
Едкий натр	50—160	60—90	
Едкий натр Углекислый натрий	20—35 20—30	40—60	
Едкий натр Натрий хлористый	100 20	40—50	
Едкий натр Натрий хлористый	150—200 200—250	50—60	
Едкий натр Натрий фтористый	50—100 30—50	40	
Серная кислота Хромовый ангидрид	360 60	60—70	
Серебро			
Азотная кислота	66,7*1	18—25	
Серная кислота Азотная кислота	90—95*1 10—5*1	18—25	
Золото и его сплавы			
Серная кислота	12,5*1	65	
Тантал			
Азотная кислота (плотность 1,4)	100*1	18—25	
*1 В процентах по объему. *2 Масса, г. *3 Объем, мл. *4 В процентах по массе.			

25. Состав и режим ванн для травления хромистых и хромоникелевых сталей, магния, титана, вольфрама, молибдена и их сплавов

Компоненты	Содержание, г/л	Температура, °С	Время обработки, мин
<i>Хромистые стали</i>			
Соляная кислота	100—200	40—50	3—10
Плавиковая кислота	4—5		
Соляная кислота	150—155	40—60	3—5
Азотная кислота	7—8		
Присадка КС	0,12—0,15		
Соляная кислота	100—150	40—50	30—40
<i>Хромоникелевые стали</i>			
Серная кислота	250—300	40—50	40—80
Соляная кислота	400—450		
Соляная кислота	500—550	40—50	3—5
Азотная кислота	70—80		
Присадка КС	1,8—2,2		
<i>Магний и его сплавы</i>			
Уксусная кислота ледяная	175	20—25	0,5—1
Азотнокислый натрий	50		
Ортофосфорная кислота	48	20—25	0,5—5
Азотная кислота	60		
Азотная кислота	60	18—20	0,5—1
Серная кислота	110		
Окись хрома	180	75—85	0,5—2
Азотнокислый натрий	30		
Фтористый магний	0,25		
Окись хрома	280	15—20	0,5—3
Азотная кислота	25		
Плавиковая кислота	8		
Окись хрома	180	15—20	0,5—2
Азотнокислый натрий	280		
Окись хрома	200	15—30	8—12
То же	25	60—70	8—12
Хромовая кислота	20*1	90—100	8—10

Продолжение табл. 25

Компоненты	Содержание, г/л	Темпера- тура, °С	Время обработки, мин
Титан и его сплавы			
Азотная кислота Плавиковая кислота	80*1 20*1	20—25	0,5
Азотная кислота Плавиковая кислота Вода	20*1 2*1 78*1	18—20	3—5
Соляная кислота Плавиковая кислота Вода	15*1 5*1 80*1	18—20	3—5
Молибден и вольфрам			
Селитра калиевая	Н. р.*2	300—350	0,5—1,0
*1 В процентах по объему. *2 Насыщенный раствор.			

26. Режим травления для удаления с поверхности стали незначительного слоя окислов

Операция	Среда	Темпе- ратура, °С	Время обра- ботки, мин
Травление	Кислотный раствор	18—25	1—3
Промывка	Проточная холодная вода		1
Обработка в антикоррозионном растворе	Нитрит натрия		0,5
Промывка	Проточная горячая вода	70—90	0,5
Сушка	Горячий воздух	70—80	5—10

27. Технологический процесс травления изделий из нержавеющей сталей, чугуна, меди и ее сплавов

Операция	Среда	Содержание, г/л	Температура, °С	Время обра- ботки, мин
Нержавеющая сталь				
Предварительное травление	Едкий натр Марганцевокислый калий	240 2	90	60–120
Промывка	Проточная холодная вода	—	13–20	1–2
Травление	Азотная кислота Перекись водорода	900 45	18–20	10–20
Промывка	Проточная холодная вода	—	18–25	1–2
Травление	Соляная кислота Хлористая медь	450 2	13–20	20–30
Промывка	Проточная холодная вода	—	18–20	1–2
Травление	Азотная кислота	900	13–20	5
Промывка	Проточная холодная вода	—	13–20	1–3
Сушка	Горячий воздух	—	70–80	10–15
Чугун				
Травление*1	1. Серная кислота Соляная кислота Присадка «Уникол»	180–200 120–140 3–5	25–30	1
	2. Серная кислота Присадка «Уникол»	210–220 3–5	70–80	1
Промывка	Проточная холодная вода	13–25	—	10–15*2
Снятие шлама травильного	Серная кислота Азотная кислота	75–80 100–110	18–25	2–3*2
Промывка	Проточная холодная вода	—	13–25	10–15*2
Обработка в антикоррозионном растворе	Нитрит натрия	50–80	18–25	2–3*2
Сушка	Горячий воздух	—	70–80	3–5
*1 Травить в растворе 1 или 2. *2 В секундах.				

Продолжение табл. 27

Операция	Среда	Содержание, г/л	Температура, °С	Время обработки, мин
Медь и ее сплавы				
Травление предварительное	Азотная кислота Соляная кислота	100,0 10	18—25	2—3
Травление окончательное	Серная кислота Азотная кислота Соляная кислота	100,0 100,0 10—20	18—25	2—3
Промывка	Холодная проточная вода	—	18—25	10—15
Нейтрализация	Углекислый натрий	150	18—25	10—15
Промывка	Проточная горячая вода	—	70—90	10—15
Сушка	Горячий воздух	—	80—90	60—120

28. Технологический процесс травления изделий из нержавеющей, кислотоупорных, жаростойких и жаропрочных сталей

Компоненты и операции	Содержание, % по объему	Температура, °С	Время обработки, мин
Едкий натр Натрий азотнокислый	80 20	400—500	3—5
Промывка	Проточная вода	18—25	1—2
Серная кислота Хлористый натрий	18	70—80	5—10
Промывка	Проточная вода	18—25	1—2
Азотная кислота	6—8	45—50	3—5
Промывка	Проточная вода	18—25	1—2
Сушка	Горячий воздух	70—80	10—15

29. Состав растворов и режимы для травления никеля, меди и сплавов на их основе

Компоненты	Содержа- ние, мл	Темпера- тура, °С	Время, мин	Назначение
Никель и его сплавы				
Серная кислота	230*1	—	—	Никель
Калий двуххромовокислый . . Соляная кислота Вода дистиллированная . .	120*2 1000 1000	18—20	1—2	Матирование никеля
Уксусная кислота Вода дистиллированная . .	100 900	80—90	3—5	Никелевые катоды
Надсернокислый аммоний . . Вода дистиллированная . .	100*2 900	18—20	5	
Уксусная кислота ледяная Азотная кислота Соляная кислота	700 300 300	75—80	15—30*3	Никель, ковар
Серная кислота Вода дистиллированная . .	10*2 1000	18—20	До полной очистки от окалины	
Кислота ортофосфорная . . Азотная кислота Уксусная кислота Тиомочевина	550 200 250 0,2*2	18—20	20—30*3	
Соляная кислота Вода дистиллированная . .	500 500	80—90	≥ 5 до полной очистки от окалины	Ковар. Для получе- ния блестящей по- верхности
Азотная кислота Вода дистиллированная . . Соляная кислота	500 500 500	60—80	3—5	
Азотная кислота Фтористоводородная кислота	33*4 4*4	65—75	—	Инконель
Серная кислота Сегнетова соль	10*4 0,75*5	70—80	—	
Серная кислота Калий двуххромовокислый . .	25*4 1,2*5	18—20	—	Нейзильбер
Серная кислота Железо сернокислое (обез- воженное)	10*4 0,75*5	60	—	

Продолжение табл. 29

Компоненты	Содержа- ние, мл	Темпера- тура, °С	Время, мин	Назначение
Серная кислота Вода	6 1000	18—20	10	Ножки с никель-пла- тиновыми выводами
Серная кислота Азотная кислота Вода дистиллированная . .	500 250 250		2—3-кратное погружение	
Аммиак водный Вода дистиллированная . .	100 900		2—3-кратное погружение	Константан
Медь и ее сплавы				
Серная кислота Натрий двуххромовокислый	12.5*4 1—3*5	18—80	—	Удаление окалины
Серная кислота Железо сернокислое (обез- воженное)	10*4 10*4	50—80	—	—
Хромовый ангидрид Серная кислота Вода дистиллированная . .	300*2 50 950	18—20	2—3-кратное погружение	Латунь
Соляная кислота Калий фтористый Вода дистиллированная . .	100 5*2 900	85—90	4—6	Бронза бериллиевая. Только для снятия окалины
Азотная кислота Серная кислота Вода дистиллированная . .	500 250 250	60—70	20—30*3	
Хромовый ангидрид	300*2	Комнат- ная	2—3-кратное погружение	
Серная кислота Вода дистиллированная . .	500 950	—	—	Сплавы с содержа- нием меди менее 85%, только для ослабленного слоя окалины
Серная кислота	10*4	50—80	—	
Серная кислота Азотная кислота	20—30*4	70—80	—	
Серная кислота	—	130—135	8	Медные блоки, изго- товленные электро- искровым способом
Соляная кислота Вода дистиллированная . .	500 500	85—90	3	

Продолжение табл. 29

Компоненты	Содержа- ние, мл	Темпера- тура, °С	Время, мин	Назначение
Ацетон	—	18—20	По 40 с каждой стороны	С ультразвуком при частоте 20 кГц
Ортофосфорная кислота (удельный вес 1,7)	550		2—8	Полировка
Уксусная кислота	350			
Азотная кислота	100			
Тиомочевина	0,2*2			

*1 Содержание, г/л.

*2 Масса, г.

*3 Время, с.

*4 В процентах по объему.

*5 В процентах по массе.

Примечание. Плотность серной кислоты 1,84 г/см³; азотной — 1,4 г/см³; соляной — 1,19 г/см³.

30. Состав растворов для химического травления меди и ее сплавов
(температура растворов комнатная)

Компоненты	Составы ванн												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Азотная кислота, см³	1000	1000	1000	1450	1000	54	4500	72	20	543	543	20	35
Серная кислота, см³	1000	1000	5000	3000	1000	54	4500	435	80	543	271	80	65
Соляная кислота, см³	10	—	—	—	20	185	2	1	—	—	—	—	1
Хлористый натрий, г	—	10	15	26	—	1	185	—	—	10	20	—	—
Сажа ламповая, г	10	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100—200	100—150
Вода, см³	—	—	—	—	—	—	1136	491	200	—	—	—	—
Хромовый ангидрид	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	20—100	10—20

31. Технологический процесс травления деталей из алюминия и его сплавов

Операция	Среда	Температура, °C	Время обра- ботки, с
Первый вариант			
Травление	Едкий натр	70—80	10—15
Промывка	Проточная холодная вода	18—25	10—15
Осветление	Азотная кислота Серная кислота	18—25	5—10
Промывка	Проточная холодная вода	18—25	10—15
Промывка	Проточная горячая вода	70—80	10—15
Сушка	Горячий воздух	80—90	5—10

Продолжение табл. 31

Операция	Среда	Температура, °С	Время обработки, с
Второй вариант			
Травление	Ортофосфорная кислота концентрированная 25% (по объему) Хромпик 0,2% (по объему) Вода	18—25	5—10
Промывка	Проточная холодная вода	18—25	10—15
Сушка	Горячий воздух	80—90	5—10
Примечания: 1. Окалину, появившуюся после термообработки, с алюминия удаляют раствором 1% HF и 1% HNO₃ (по объему); с дюралюминия — раствором 1% NaF (по массе) и 6,25% H₂SO₄. 2. Для осветления сплавов алюминий—кремний применяют раствор 900 г/л азотной кислоты и 30 г/л плавиковой кислоты. Для чистого алюминия и его сплавов используют раствор состава: 100 г/л хромового ангидрида и 15 г/л серной кислоты.			

32. Состав ванн для травления олова, свинца, цинка, кадмия и их сплавов

Компоненты	Состав, %	Назначение
Соляная кислота Азотная кислота	50—100 25—50	Олово
Азотная кислота	50—100	Олово, цинк, свинец, кадмий
Едкий натр Соляная кислота Серная кислота	50—60 40—100 30—100	Цинк
Едкий натр	100—600	Цинковые сплавы
Соляная кислота Присадка ПБУ	400—450 25	Снятие ржавчины с оцинкованных изделий

33. Технологический процесс травления титана и его сплавов

Операция	Компоненты	Содержание, %	Температура, °С	Время обработки, мин
Шлифование		—	—	До удаления естественной окисной пленки
Травление	Азотная кислота Плавиковая кислота	80 20	18—30	До выделения красного дыма
Промывка	Дистиллированная вода	—	18—20	—

Продолжение табл. 33

Операция	Компоненты	Содержа- ние, %	Темпера- тура, °С	Время обра- ботки, мин
Травление	Двуххромовокислый натрий Плавиковая кислота	50 50	70—80	20
Промывка	Проточная вода	—	18—20	—

34. Технологический процесс очистки поверхности бериллия

Операция	Компоненты	Темпера- тура, °С	Время обра- ботки, мин
Промывка	Дистиллированная вода	18—20	5—10
Травление	Азотная кислота (70%-ная)	18—20	1
Промывка	Проточная вода	18—20	5—10
Травление	Сернокислый аммоний (10%-ный)	18—20	0,5
Промывка	Проточная вода	18—20	5—10

35. Состав травильных паст

Компоненты	Состав, %	Компоненты	Состав, %
Бисульфат натрия	30	Соляная кислота	40
Кремнефтористый магний	5	Инфузорная земля	20
Инфузорная земля	65	Фосфорная кислота	20
		Инфузорная земля	20
Соляная кислота	8	Фосфорная кислота	80
Глинозем	2	Крахмал	10
Хлорид меди	90	Глицерин	10
Примечание. Воду добавляют до требуемой консистенции.			

36. Состав электролита и режим для электрохимического травления

Металл или сплав	Состав	Режим *1			Род тока и назначение
		Время	Плотность анодного тока, А/дм²	Напряжение, В	
Никель, молибден, ковар, нержавеющая сталь	Серная кислота (плотность 1,84) 500 мл Вода 500 мл	10—40 с	40—180	2—4	Для слабо-окисленных поверхностей
	Серная кислота (плотность 1,84) 750 мл Вода 250 мл	10—40 с	40—180	2—4	
Молибден, вольфрам	Натрий азотнокислый 500 г Вода дистиллированная 500 мл 20%-ный раствор едкого натра (удельный вес 1,2—1,3) 500 мл	≥ 5 мин 30—60 с	10—30 5—7	12—35 50—70	Переменный ток
	Две последовательные операции: 1. Серная кислота 100 мл Вода дистиллированная 900 мл 2. Ортофосфорная кислота (плотность 1,5—1,7)	≥ 5—10 мин 10—60 с	— 30—40	— 12—18	
Сталь нержавеющая, никель	Ортофосфорная кислота (удельный вес 1,7) 65% Серная кислота (удельный вес 1,84) . . . 15% Хромовый ангидрид 5% Глицерин 12% Вода дистиллированная 3%	≥ 15—30 мин *2 2—3 мин *3	6—7	4—6	—
Черные и цветные металлы	20%-ный раствор едкого натра (плотность 1,2—1,3)	30—60 с	5—7	50—70	Переменный ток

*1 Температура предпоследнего раствора (для нержавеющей стали и никеля) 45—70° С, всех остальных растворов — комнатная.
*2 Для стали.
*3 Для никеля.

*1 Температура предпоследнего раствора (для нержавеющей стали и никеля) 45—70° С, всех остальных растворов — комнатная.
*2 Для стали.
*3 Для никеля.

37. Состав электролита и режим травления углеродистой стали

Компоненты	Содер- жание, г/л	Режим			Назначение
		Темпе- ратура, °C	Плот- ность тока, А/дм²	Время обра- ботки, мин	
Анодное травление					
Серная кислота	200—250	40—60	5—10	10—20	Детали, имеющие окалину
Серная кислота	10—20	18—20	5—10	15—30	
Сернокислое железо	200—300				
Хлористый натрий	30—50				
Хлористое железо	30—50	40—50	5—10	0,5	Детали с опескост- руенными по- верхностями
Соляная кислота	30—50	60—80	100—200	0,1	
Серная кислота	150				
Сернокислое железо	50				
Хлористый натрий	50	20—50	5—10	10—15	Детали, имеющие небольшую ока- лину
Хлористое железо	150				
Соляная кислота	10				
Серная кислота	100	30	100	0,5	
Соляная кислота	350	30—40	5—10	1—8	Железные сплавы с кремнием
Плавиковая кислота	0,5—				
Катодное травление					
Серная кислота	100—150	40—50	3—10 *	10—15	—
Серная кислота	50	60—70	8—10 **	10—15	—
Соляная кислота	30				
Хлористый натрий	20				
* Анодом служит свинец или его сплавы с сурьмой. ** Анодом служит кремнистый чугун (20—24% Si) или сплав свинца с сурьмой (10—15% Sb).					

38. Состав электролитов и режим травления легированной стали

Компоненты	Содержание, г/л	Режим работы		
		Температура, °С	Плотность тока, А/дм²	Время обработки, мин
Анодное травление				
Серная кислота	50	60—70	20—30	10—15
Едкий натр	500	150	10	10
Серная кислота	80—100	40—50	20—30	5—10
Травление переменным током напряжением 15—20 В				
Серная кислота	35—40	15—20	5—10	5—10
Азотная кислота	25—30			

Удаление изоляции с проводников химическим путем. Для изоляционных покрытий некоторых типов термическое и механическое удаление малоэффективно. Такие покрытия снимают действием химического реагента. Учитывая химическую активность растворов, во избежание коррозии после химического удаления изоляции производят промывку в ванне или струей воды (см. табл. 1).

Электрохимическое травление. Для ускорения очистки поверхностей деталей от окислов и окалины применяют электрохимическое травление. Обрабатываемые детали помещают в качестве анода (анодное травление) или катода (катодное травление) в электролитическую ванну. При анодном травлении, когда катодом служит пластина из никеля или свинца, а анодом — очищаемые детали, происходит растворение поверхностного слоя металла изделий и одновременное удаление включенных в него окислов и других загрязнений, чему способствует кислород, выделяющийся на аноде во время электролиза. При катодном травлении в качестве анодов применяют свинцовые листы, графит, уголь и олово. Очистка происходит благодаря восстановлению окислов выделяющимся на катоде водородом.

Катодное травление более интенсивно, чем анодное, поэтому следует опасаться перетравливания деталей. Кроме того, необходимо принимать соответствующие меры защиты металла от наводороживания, которое вызывает хрупкость. Углубленные участки деталей сложного профиля травятся медленно, и для ускорения процесса применяют дополнительные внутренние электроды. Режимы и составы растворов для электрохимического травления приведены в табл. 36—38 [3, 17, 19].

Травление с помощью ультразвука. При очистке деталей от окислов ультразвук применяют для ускорения процесса и снижения необходимой концентрации кислот. Ультразвуковая очистка деталей в 100 раз производительнее химического травления. В отличие от обезжиривания с помощью ультразвука здесь в качестве очищающей среды используют растворы кислот, предназначенные для растворения окислов металлов. При этом растворяющее действие кислот совмещается с механическими воздействиями кавитационных пузырьков. Увеличивает скорость реакции и перемешивание жидкости, происходящее в ультразвуковых ваннах [20].

После обработки ультразвуком изделия необходимо промыть в чистой воде, а раствор очистить от примесей.

39. Состав и режимы работ ванн для комбинированной обработки стали и чугуна

Компоненты	Содержание, г/л	Температура ванны, °С	Время обра- ботки, мин	Компоненты	Содержание, г/л	Температура ванны, °С	Время обра- ботки, мин
Сталь				Снятие шлама:			
Ортофосфорная кис- лота	100—300	60—70	—	хромовый ангид- рид	200	80—90	—
Эмульгатор ОП-7 или ОП-10	3—5			ортофосфорная кислота	50		
Тиомочевина	3—5						
Серная кислота	30	50—60	—	Чугун			
Эмульгатор ОП-7 или ОП-10	3—5			Серная кислота	100	50	5—15
Тиомочевина	3—5			Соляная кислота . . .	50		
				Эмульгатор ОП-7 . . .	5		
Ортофосфорная кис- лота	100	70—75	—	Пассивирование чугуна после травления			
Фосфорнокислый нат- рий	50			Нитрит натрия	15—20	18—25	3—5
Эмульгатор ОП-7 или ОП-10	30			Углекислый натрий	2—3		
Тиомочевина	5						

Комбинированное обезжиривание и травление. Для предварительной очистки деталей от продуктов коррозии, окислов и жировых загрязнений применяют комбинированное обезжиривание и травление. Для антикоррозионной защиты при хранении изделий после химической обработки применяют пассивирование и сушку.

Составы и режимы работ ванн для комбинированной обработки стали и чугуна приведены в табл. 39.

Промывка деталей после химической очистки. При промывке деталей в воде недопустимо переносить химические реактивы из обезжиривающих ванн в травильные и наоборот.

Промывку выполняют погружением деталей в стальные ванны, наполненные холодной и горячей водой.

Для лучшей промывки деталей применяют ванны с душевыми устройствами или специальные моечные машины с разбрызгивающим устройством.

Детали можно промывать в проточной или дистиллированной воде, затем в ацетоне (хорошо поглощает остатки влаги) и окончательно сушить в сушильной камере.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ НАНЕСЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Металлические покрытия наносят на поверхность деталей с целью:

облегчения процесса пайки труднопаяемых металлов (технологические покрытия);

предотвращения нежелательного взаимодействия припоя и паяемого металла (барьерные покрытия);

облегчения процесса пайки, при этом наносят припой;

устранения пористости поверхности паяемого металла (в случае необходимости получения вакуумноплотного соединения);

обеспечения пайки неметаллических материалов (керамики, графита и других).

Покрытие, нанесенное в места пайки, должно прочно сцепляться с основным материалом. Во время последующих нагревов в процессе неизбежной технологической обработки покрытия не должны вздуваться и отслаиваться.

При пайке некоторых металлов и сплавов, покрытых устойчивыми окисными пленками, обычно применяемые способы удаления этих пленок (флюсование, применение восстановительных и нейтральных газовых сред и т. п.) могут оказаться недостаточными. К таким металлам относятся алюминий, алюминиевая бронза, высоколегированные стали, чугун и др. В этих случаях для успешного затекания припоя в зазор применяют предварительное покрытие поверхности паяемых деталей припоем или металлом, на которых при пайке образуются менее стойкие и, следовательно, легче паяемые окислы металла или сплава. Для этой цели применяют олово, медь, серебро, кадмий, железо, никель и сплавы: олово — свинец, олово — цинк и олово — медь.

Способы нанесения металлических покрытий на поверхности деталей даны на рис. 9.

Наиболее широко применяют лужение натиранием и погружением. В некоторых случаях применяют метод реактивного лужения.

Горячее покрытие изделий погружением в жидкий припой можно производить через слой расплавленного флюса или окунанием в жидкий флюс, а затем в ванну

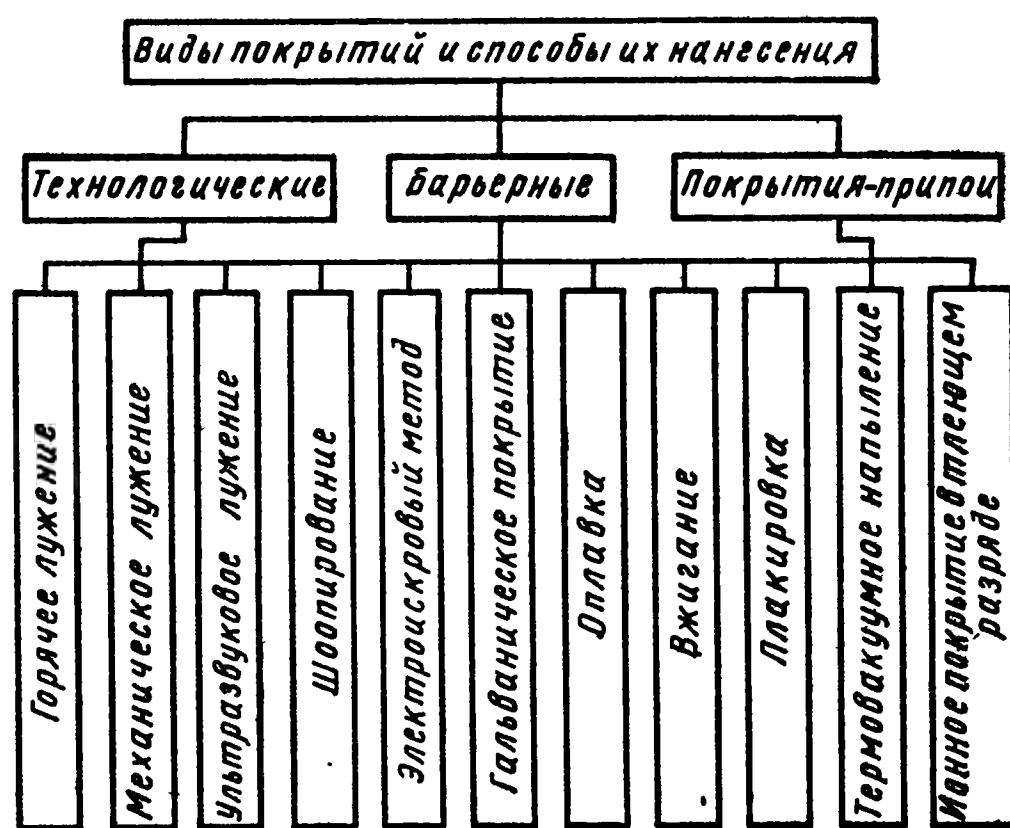


Рис. 9. Виды покрытий и способы их нанесения

с расплавленным припоем (рис. 10). Излишки незастывшего припоя удаляют вибрацией, обдувкой сжатым воздухом, центрифугированием.

Для получения качественного лужения необходимо обеспечивать удаление окислов с поверхности лудильной ванны, для этого создают защитный слой флюса или графитового порошка, которые надо периодически возобновлять.

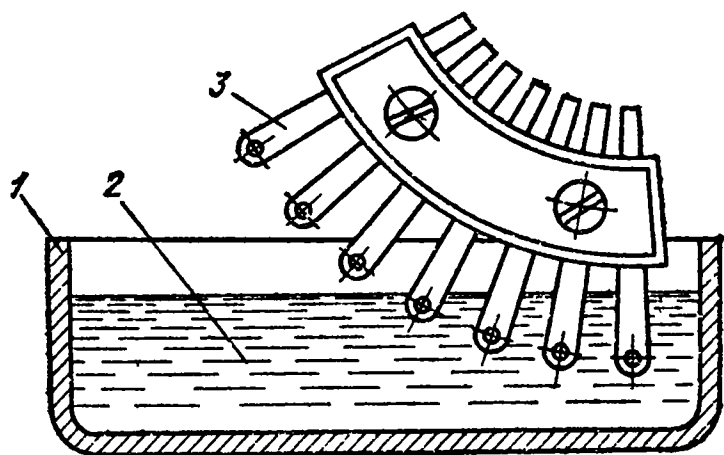


Рис. 10. Лужение погружением:
1 — тигель; 2 — расплавленный припой; 3 — детали, подвергающиеся лужению

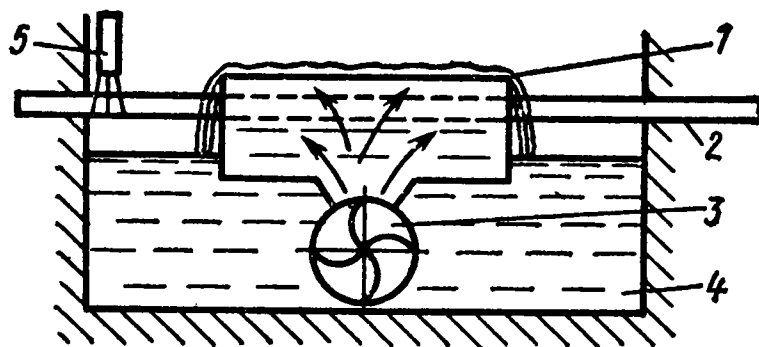


Рис. 11. Схема лужения трубок радиатора:

1 — волна припоя; 2 — трубка радиатора; 3 — насос; 4 — ванна с припоем; 5 — сжатый воздух

Схема лужения трубок радиатора показана на рис. 11. Чтобы припой в процессе лужения не попадал внутрь трубок, последние перед подачей под приемные ролики заглушают.

Для лужения относительно небольших деталей, не имеющих внутренних полостей, пользуются лужением через слой флюса в специальных ваннах (рис. 12).

При лужении через слой флюса подготовленные детали опускают через флюс в олово или другой припой. Скорость погружения должна быть такой, чтобы деталь, проходя флюс, могла нагреваться до температуры, при которой не происходит разбрызгивания олова.

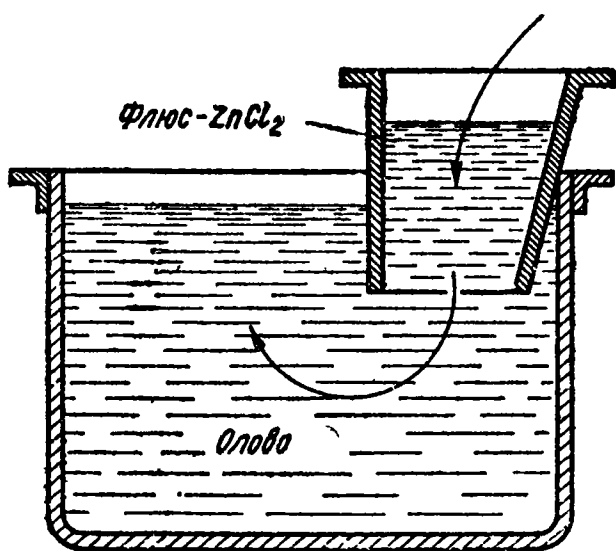


Рис. 12. Конструкция ванны для лужения через слой флюса

Температура в ванне должна быть постоянной, так как повышение температуры приводит к увеличению угара припоя и снижению качества лужения, а пониженная температура затрудняет условия лужения и увеличивает расход припоя за счет наплывов на луженой поверхности.

Толщина покрытия влияет на паяемость луженых деталей. Покрытие толщиной менее 0,0025 мм будет иметь удовлетворительную паяемость, если пайка производится немедленно после обработки поверхности. Считается, что примерно такая же толщина покрытия достаточна для пайки при небольшом сроке хранения. При продолжительном хранении толщину покрытия берут до 0,03 мм.

Гальванические покрытия наносят в стационарных ваннах, в конвейерных установках или во вращающихся барабанах. Этот метод применим для всех сталей, медных сплавов, никелевых сплавов, для цинковых отливок под давлением и алюминия. Для покрытий применяют не только чистые металлы, но и сплавы: Sn — Cu, Sn — Zn, Sn — Cd, Sn — Ni и др. Лужение с помощью ультразвука можно производить паяльником или погружением в ванну с припоем (рис. 13).

Шоопирование может быть применено для металлизации поверхности как чистыми металлами, так и сплавами. Недостаток этого метода состоит в том, что при переносе капель жидкого сплава на металлизированную поверхность капли могут сильно окисляться. Вследствие окисления нанесенный слой представляет собой смесь металла и относительно большого количества (до 30%) его окислов. Этот способ более эффективен для самофлюсующих припоев.

Метод электроискрового нанесения металлов и сплавов малопродуктивен и позволяет получать слои толщиной не более 5—10 мкм.

Электролитический способ лужения имеет преимущества перед горячим способом: создается возможность механизации работ, уменьшается расход припоя, обеспечивается более равномерная и более чистая поверхность покрытия.

Однако электролитический способ лужения имеет и свои недостатки. К их числу относятся неустойчивость гальванических покрытий в органических кислотах; малая сопротивляемость покрытий при низких температурах (например, переход в серое олово — «оловянная чума»); затрудненность лужения в местах соединения отдельных деталей; необходимость больших площадей производственных помещений.

При работе лудильных ванн припой загрязняется железом и кислотой, что приводит к образованию тяжелого (железистого) олова. Тяжелое олово не позволяет получить равномерное и чистое покрытие. На поверхности изделия появляются наплывы, которые приводят к перерасходу припоя.

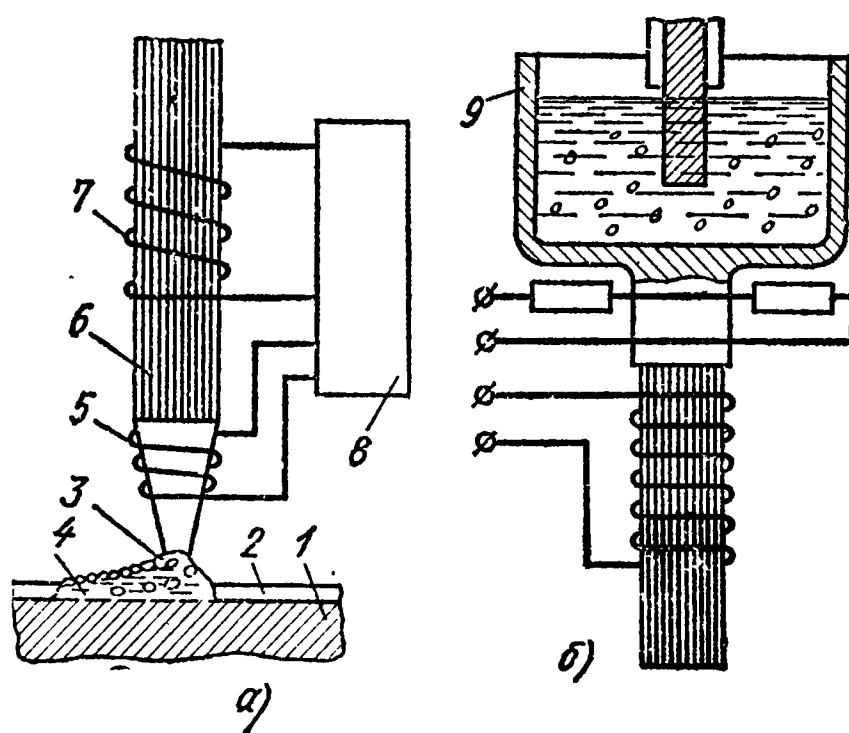
Для улучшения качества лужения и экономного расходования припоя необходима регулярная очистка от железистого олова толченой серой.

Количество серы берут из расчета 50—60% от массы железа в припое.

Процесс рафинирования ведут в течение 20—60 мин в зависимости от содержания железа в припое. Как только образуются сульфиды железа (Fe_2S_3), которые всплывают на поверхность припоя, вводят порошкообразную смесь канифоли и древесного угля в соотношении 1 : 3 в общем количестве 70% к массе введенной серы. После этого сплав нагревают до температуры 300—400° С и перемешивают до образования на поверхности сухого порошка

Рис. 13. Схема лужения с применением ультразвука:

а — при работе паяльником; б — при работе в ванне; 1 — алюминиевая деталь; 2 — окисная пленка; 3 — жидкий припой; 4 — частички окисной пленки; 5 — электронагревательная обмотка; 6 — вибратор; 7 — обмотка возбуждения вибратора; 8 — генератор ультразвука; 9 — ванна



черного цвета. Очищенную поверхность ванны покрывают древесными опилками слоем 3—4 мм и сплав перемешивают. Опилки способствуют выгоранию серы и предотвращают образование сернистого олова.

Некоторые детали электровакуумных приборов изготовляют из металлов и сплавов, выплавленных в окислительной среде, чаще всего на воздухе. Такие металлы и сплавы имеют большое количество дефектов, снижающих их вакуумную плотность. В первую очередь это относится к железу, ковару, нержавеющей сталям. В прутках этих материалов много волосовин и микроскопических трещин. Изготовленные из них детали, ограждающие вакуумную полость прибора, могут служить причиной натекания воздуха в прибор, поэтому их необходимо предварительно оплавлять медью. Толщина наплавленного слоя меди в готовой детали составляет 0,5—1 мм. Оплавление медного покрытия обычно производится в атмосфере водорода, в среде азота (процесс требует более тщательной подготовки поверхности) и в вакууме порядка 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст. с нагревом т. в. ч. под кварцевым колпаком. Последний способ имеет преимущества перед другими.

Для осуществления пайки металлов с неметаллическими материалами (стеклом, керамикой и т. п.) на поверхность последних наносят металлизационный слой вжиганием.

Для этого неметаллическую поверхность покрывают пастой (платино-серебряной или молибдено-марганцевой), которую вжигают в атмосфере влажного водорода при температуре 1200—1300° С. При этом поверхность покрывается слоем металла, например, молибдена. Для улучшения смачивания в дальнейшем поверхность можно никелировать.

Нанесение покрытия может быть произведено совместной прокаткой основного металла и металла-покрытия (плакировка). Толщина слоя при этом значительна — порядка 0,1 мм.

Способность плакированной детали к пайке можно характеризовать коэффициентом термического расширения плакирующего материала. Пайка получается качественной при коэффициенте термического расширения плакирующего материала больше 60%.

Высокое качество покрытий обеспечивается нанесением металлов в вакууме в результате их испарения (термовакuumный способ). Этот метод дает возможность получать равномерные покрытия малых толщин (2—100 мкм) в условиях, обеспечивающих отсутствие окисления основного металла и металла-покрытия.

Получение наиболее надежных и качественных покрытий обеспечивается при нанесении их в тлеющем разряде в ионизированном состоянии [13]. При этом обеспечивается возможность равномерного покрытия на всей поверхности детали. Обработка покрываемой поверхности быстрыми частицами нейтрального газа в той же камере непосредственно перед нанесением покрытий обеспечивает удаление окислов с покрываемой поверхности.

Покрытие наносится в электрическом поле при разности потенциалов до 10 кВ, что способствует надежному сцеплению покрытия с основным материалом.

Эта особенность метода позволяет получать надежные покрытия практически на любом материале (керамике, ситалле, магниевых сплавах и т. п.).

Контроль качества покрытий. Требования, предъявляемые к качеству покрытий, определяются их назначением и являются основанием для выбора метода контроля.

Различают следующие виды контроля: контроль внешнего вида изделий после покрытия (цвет, блеск, шероховатость поверхности); определение пористости и толщины слоя покрытий; испытания на коррозионную стойкость; определение механических и физических свойств покрытий (пластичности, стойкости при высоких температурах и др.).

Оценку качества покрытий производят:

по внешнему виду (осмотр невооруженным глазом) на основании сравнения с эталонами;

по результатам лабораторных методов испытания на основании требований к покрытиям, установленных техническими условиями.

Сцепляемость покрытия с основным металлом испытывается для листового материала загибом на угол 90° или 180° до поломки образца; для проволоки — навивкой образца вокруг стержня того же или большего диаметра в зависимости от диаметра и назначения проволоки. Во всех случаях испытаний на сцепляемость не должно быть трещин и отслаивания покрытия.

Коррозионная устойчивость покрытий определяется методом ускоренных испытаний в искусственно создаваемых коррозионных средах и по данным поведения покрытий в естественных условиях их эксплуатации. Средой для искусственных испытаний могут быть туман раствора поваренной соли, созданный в специальной камере, или атмосфера агрессивного газа, соответствующего условиям эксплуатации изделия, и другие [19].

Предотвращение растекания припоя. В практике пайки часто требуется ограничить растекание припоя по поверхности паяемого металла. Для ограничения растекания применяют следующие способы.

1. Нанесение покрытий на поверхность паяемого материала. Для этого используют составы (частей по массе): а) глиноземная пудра 1, окислы металлов (Si, Ti, Ge, Zr, Sn, Ce, Hf, Pb, Th) 1, разбавитель (растворитель или связка) 10; б) паста из мела, глины, графита или известковый раствор; в) порошок Al_2O_3 15—20; ацетон 90—100; отходы органического стекла 0,9—1,1; г) бихромат калия 5—50; д) сернокислый магний 1—30; температура 40—80° С; наносят тонким слоем; вредных газов при нагреве не образуется, разъедания поверхности не происходит; на металлизационные покрытия этот слой не оказывает отрицательного влияния; е) раствор хромовой кислоты (наносит на полированную поверхность); при нанесении кислоты на окисленную поверхность возможно проникновение припоя под слоем кислоты через губчатую оболочку окисла; ж) хромирование поверхности.

2. Механическим путем: а) созданием полированной поверхности; б) нанесением канавок на пути течения припоя.

- 3. Регулирование режима пайки или выбор состава среды. Достигается ограничением продолжительности процесса пайки. Возможно также уменьшить содержание активного компонента в контролируемой среде.
- 4. Уменьшение количества припоя или использование в качестве него металлов, плохо смачивающих паяемый металл (для меди это сплавы, содержащие хром, алюминий, ванадий).

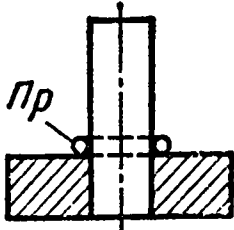
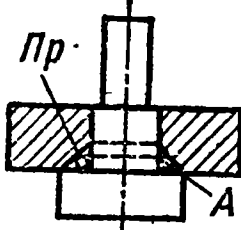
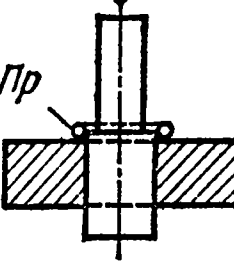
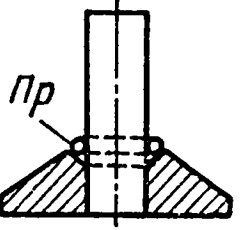
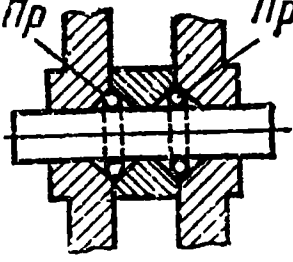
СБОРКА ПОД ПАЙКУ И НАНЕСЕНИЕ ПРИПОЯ

Способ сборки узлов для пайки имеет большое значение, если учесть, что пайку применяют для повышения качества или уменьшения стоимости продукции. Способ сборки предусматривают в период конструирования узла. Наиболее экономична сборка в тех случаях, когда взаимное расположение деталей обеспечивается их конструкцией, а припой наносится заранее независимо от метода пайки.

При сборке с запрессовкой следует учитывать температурные коэффициенты линейного расширения деталей (особенно из неоднородных материалов или при пайке деталей больших размеров).

Примеры сборки деталей приведены в табл. 40.

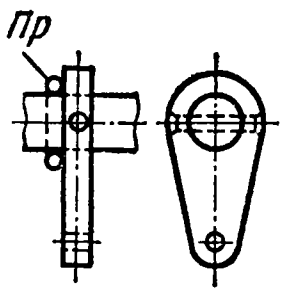
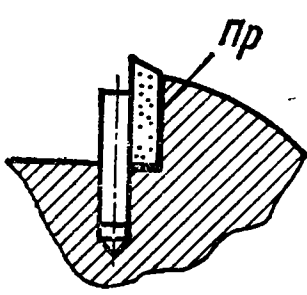
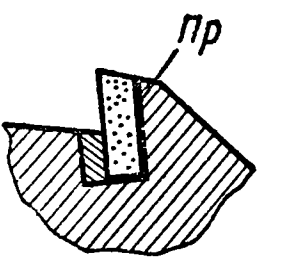
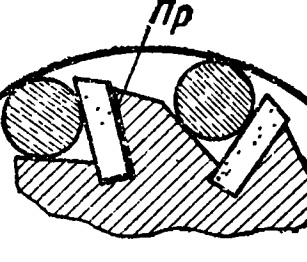
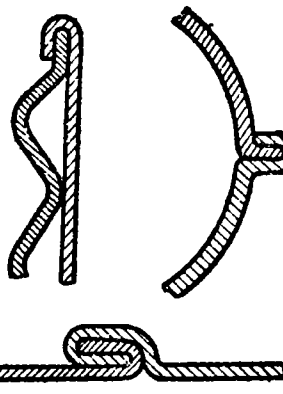
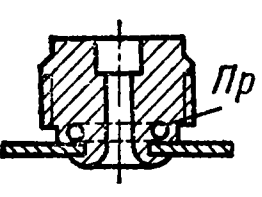
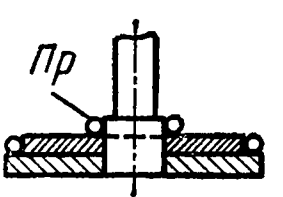
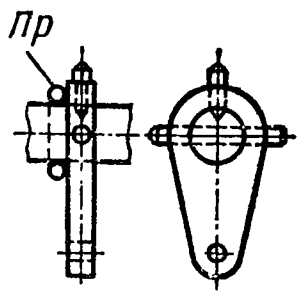
40. Примеры соединения деталей при пайке медью

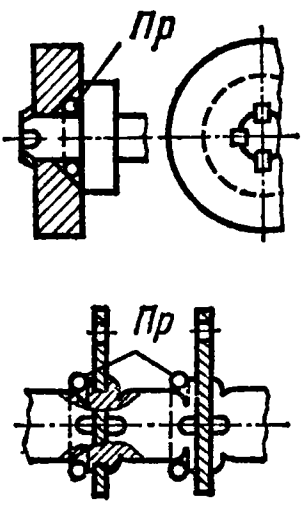
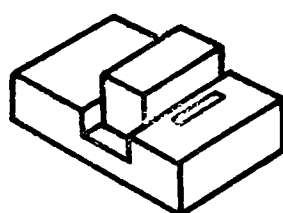
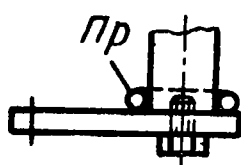
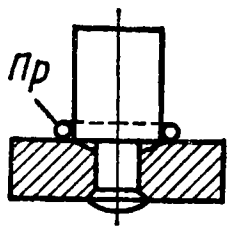
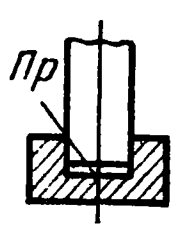
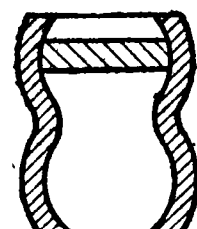
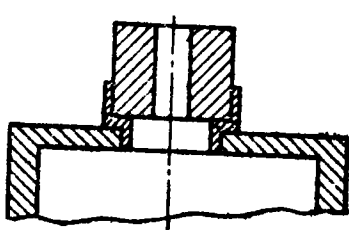
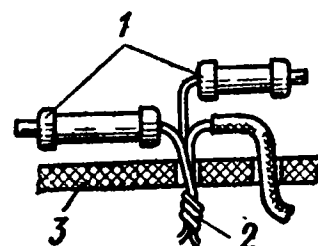
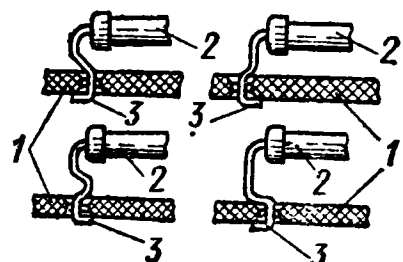
Способ закрепления	Эскиз и характеристика	
Запрессовка штыря. Дополнительного закрепления не требует.	Сборка запрессовкой	
	 Припой хорошо проходит через все соединение под действием капиллярных сил	 В случае, когда фланец скошен со стороны нанесения припоя, лучше сделать фланец с пазом, в котором задерживается расплавленный припой
	 При пайке стержня к фланцу выступающая часть стержня с диаметром, равным диаметру отверстия, должна позволить уложить кольцо припоя. Расплавленный припой затечет в зазор и образует соединение	 При пайке запрессованного стержня с головкой в месте А возникает полость, которая может помешать при пайке. Поэтому лучше предварительно иметь полость достаточной величины во фланце, чтобы в нее можно было вложить припой. Припой потом поднимается около стержня вверх и в зазор около головки и выступает с обеих сторон наружу
	 У длинных стержней, которые нужно паять в определенном положении, лучше всего вложить припой в полости. Рекомендуется также на половине длины соединения уложить еще кольцо припоя. Можно оснастить вал несколькими тонкими параллельными с осью пазами или винтовыми пазами, способствующими проникновению припоя	

Продолжение табл. 40

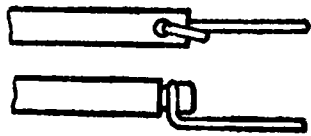
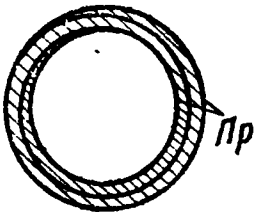
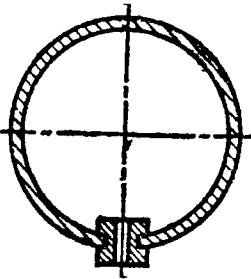
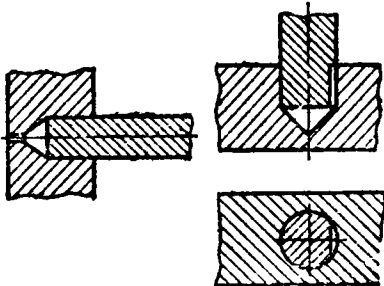
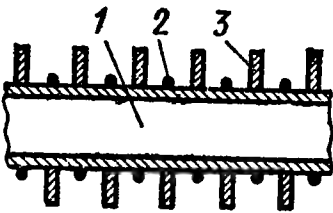
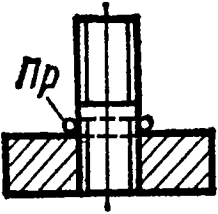
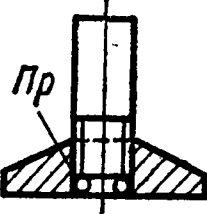
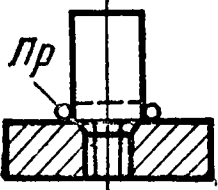
Способ закрепления	Эскиз и характеристика
Запрессовка штыря (болта) с прорезями или выступами. Дополнительного закрепления не требует.	В случае, когда стержень с прорезями прессуется на фланец, припой быстро проникает в прорези, которые хорошо заполняются Если фланец без полости, то стержень у головки должен иметь эту полость
Коническими штифтами 1	Сборка с закреплением деталей Обеспечивают фиксацию деталей с заданным зазором
Клинья 1 из слюды или фарфора, запрессованными в пазы фрезы	Клинья исключают возможность припаивания пластин из твердого сплава к противоположным стенкам паза, возникновение напряжения растяжения и образование трещин в пластинах
Кернением	Вручную можно обеспечить закрепление паяемых деталей с помощью кернов в четырех местах детали
Разгибом	При пайке трубки к фланцу конец трубки разгибают керном. Этим достигают закрепления деталей в большом зазоре и, кроме того, на разрыв соединение работает лучше. Припой уложить в полость При пайке трубок к тонким листам трубку следует лишь слегка разогнуть. Это обеспечивает хорошее соприкосновение по всей плоскости

Продолжение табл. 40

Способ закрепления	Эскиз и характеристика	
Штифтом	 Штифт при достаточном количестве припоя припаивается. Кольцо припоя имеет немного меньший диаметр, чем диаметр вала. В месте укладки должны быть острые переходные грани	 Твердосплавные пластинки крепят к корпусу режущего инструмента штифтами, которые сошлифовывают в процессе заточки инструмента
	 Твердосплавные пластинки закрепляют в пазу корпуса инструмента при помощи технологического вкладыша	 Твердосплавные пластинки крепят к корпусу режущего инструмента при помощи графитных стержней и обвязкой их мягкой проволокой по окружности инструмента
Развальцовкой	 Типы взаимозамкнутых соединений с завальцованными краями	 При пайке обточенных деталей выгодно часть их оснастить пазом для укладки припоя. Необходимы острые переходы соприкасающихся граней
Сваркой	 Детали могут быть прижаты одна к другой и сварены в двух или четырех местах. Припой целесообразно уложить в нескольких местах. Штырь в пластинах запрессован, а при свободной сборке должен быть закреплен	 Фиксация твердосплавных пластин на режущем инструменте с открытым пазом при помощи временно привариваемых технологических пластинок
Чеканкой	 Закрепление деталей может производиться ручной чеканкой в нескольких местах соприкосновения деталей. При укладке припоя надо следить за тем, чтобы припой не растекался преждевременно	
Заклепкой	 При гладкой поверхности для закрепления детали можно использовать заклепки, которые при достаточном количестве припоя также припаиваются	

Способ закрепления	Эскиз и характеристика	
Выдавливанием материала		При серийном производстве хорошие результаты дает способ выдавливания материала одной детали специальным инструментом, обычно механическим прессом, где за одну операцию деталь закрепляют в четырех или двух местах. Положение деталей при выдавливании зависит от производственных условий. Для сохранения вертикального положения деталь закрепляют с обеих сторон  При пайке наставки в паз пластины надо отфрезеровать зарубку. Деталь закрепляют легким выдавливанием материала пластины по обеим сторонам наставки. Припой укладывают около наставки в виде медной проволоки или, реже, в паз в виде медной фольги
Винтом		Сборка деталей в большинстве случаев с плотной посадкой; при больших диаметрах проникновение припоя ускоряется углублениями на конце штыря. Винт обычно полностью припаявается
Заклепкой		Используют там, где не нужны при изготовлении точные допуски, но где ввиду напряжений рекомендуется повышенная прочность соединения. При осуществлении заклепочного соединения болтов к фланцу для более быстрого затекания припоя фланец оснащается радиально расположенными углублениями
Не требуется		Припой укладывают между деталями. Детали прижаты одна к другой под действием силы тяжести 
		Сборка деталей под пайку производится с фиксатором 
		Крепление радиоэлементов 2 в узлах плоскостной конструкции 1 с изгибом проводов 3 Закрепление проводов 2 радиодеталей 1 произведено на бесконтактных панелях 3

Продолжение табл. 40

Способ закрепления	Эскиз и характеристика	
Не требуется		Скрепление провода со стержнем в радио- или электросхемах
		Паяная труба из омедненной стальной ленты. Слой меди нанесен гальваническим путем
	 	Расположение выпора при паянии полых изделий Устройство выпоров при впаивании шпилек в глухие гнезда
Дополнительного закрепления паяемых деталей не требуется		Наматывание ребер 3 на трубу 1. Проволоку (припой) 2 можно уложить одновременно с навиванием ребра
	Пайка резьбовых соединений	
		Чтобы предупредить распространение меди по резьбе, резьбу следует прерывать
		Если имеется опасность, что припой при размещении его сверху быстро течет, его можно поместить снизу в виде кольца. При этом необходимо, чтобы припой был в достаточном количестве
		Если фланец оснащен радиальными канавками, то припой при пайке резьбы может быть уложен с внешней стороны. Радиальные канавки препятствуют распространению припоя по ровной поверхности фланца

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

В некоторых случаях, когда ни один из приведенных выше способов фиксации деталей не может быть применен, используют вспомогательные приспособления. Это приводит к снижению производительности печей, так как при пайке расходуется тепло на нагревание приспособлений, к значительным затратам, связанным с изготовлением и эксплуатацией приспособлений.

Использование приспособлений позволяет повысить производительность труда, обеспечить заданную геометрию детали, локализовать нагрев поверхности паяемой детали и т. п. Применение приспособлений особенно выгодно при массовом производстве. Благодаря им отпадают излишние операции по зачистке и дополнительной механической обработке деталей после пайки.

Правила конструирования оснастки и требования, предъявляемые к ней [7, 22]:
масса оснастки должна быть минимальной;
площадь контакта оснастки с изделием должна быть минимальной;

форма деталей оснастки не должна препятствовать быстрому и равномерному нагреву изделия и вызывать его деформацию (за исключением экранов и холодильников);

конструкция оснастки не должна препятствовать свободной циркуляции газов в полости паяемого узла или их быстрой откачке при пайке в вакууме.

конструкция оснастки должна обеспечивать удобное расположение припоя. Кроме того, должно быть обеспечено наблюдение за расплавлением припоя (в случае визуального наблюдения за процессом плавления);

особое внимание должно быть обращено на согласование изменений размеров деталей оснастки и изделия при нагреве и охлаждении. Это достигается или подбором материалов с соответствующими коэффициентами термического расширения, или путем легко деформируемых деталей оснастки, или же обеспечением свободного перемещения изделия внутри оснастки;

шероховатость поверхности у разъемных соединений оснастки не ниже 8-го класса, у точных базовых поверхностей не ниже 9—10-го классов;

все переходные кромки, ограничивающие точные базовые поверхности, или поверхности разъемных соединений, должны иметь плавные закругления максимально допустимого радиуса;

сопряжения деталей оснастки с узлами и между собой должны иметь посадки с гарантированными зазорами (ходовые, широкоходовые);

необходимо обеспечить несмачиваемость оснастки жидким припоем;

все материалы оснастки должны хорошо обрабатываться и обладать термостойкостью и необходимой механической прочностью при температуре пайки;

при конструировании приспособлений для индукционной пайки необходимо, чтобы в поле индукционной катушки попадало только паяемое соединение, исключая

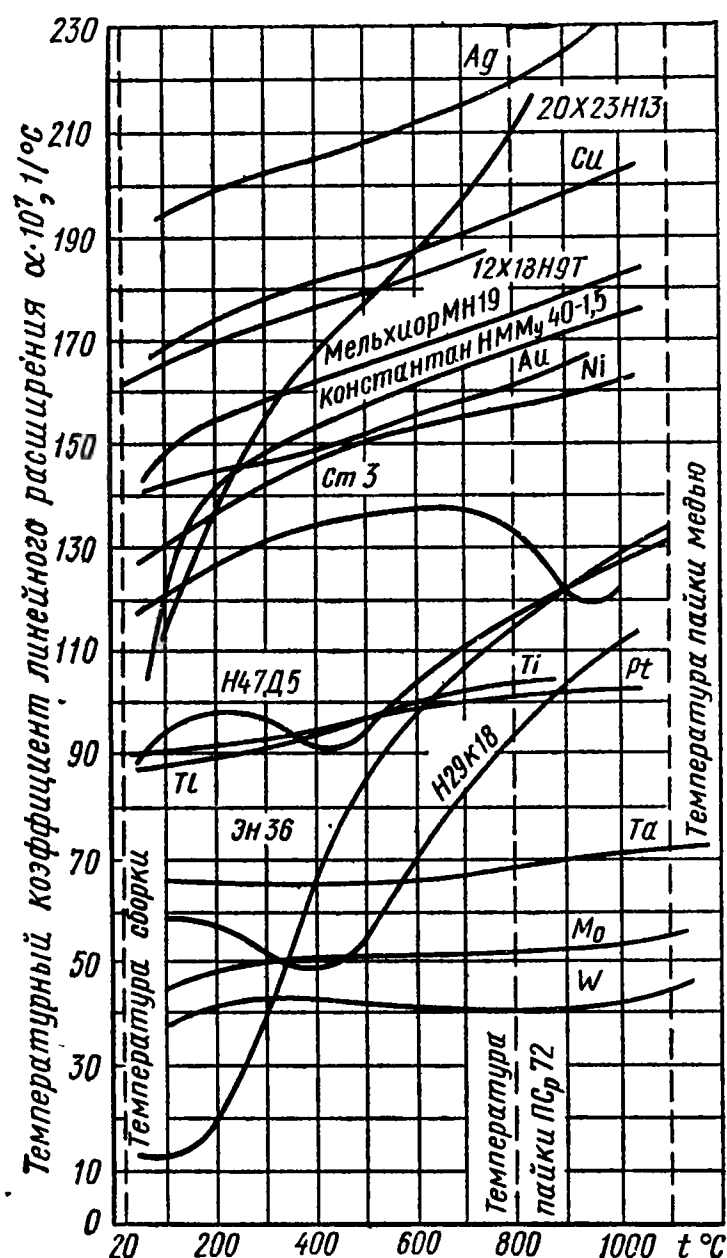


Рис. 14. Температурные коэффициенты линейного расширения для наиболее употребительных металлов и сплавов электровакуумного производства

все другие материалы. Для такой пайки применяют приспособления, выполненные из фарфора, слюды, керамики или асбеста.

Эти требования ограничивают выбор пригодных материалов сравнительно немногими сплавами, металлами и керамиками. Для элементов оснастки используют следующие материалы: стали марок 12X18H9T, 36X18H25C2, сталь 45, 20X13, нихром, молибден, никель, тантал, ковар, керамику различных марок, асбест, графиты.

Температурные коэффициенты линейного расширения в широком диапазоне температур некоторых материалов даны на рис. 14.

Сталь марки 12X18H9T при нагреве в атмосфере, содержащей незначительное количество кислорода ($> 0,005\%$) или паров воды (точка росы выше -30°C), покрывается плотной и стойкой пленкой окислов, которая плохо смачивается жидкими припоями. Эта сталь имеет температурный коэффициент линейного расширения, близкий к меди, что позволяет делать из нее точные приспособления.

Перспективна для использования сталь марки 20X23H13, у которой при температуре выше 500°C температурный коэффициент линейного расширения больше, чем у меди.

Нихром при нагреве покрывается стойкой пленкой окиси хрома. Его используют главным образом в виде ленты и проволоки.

Сталь 45, может быть использована для различных деталей оснастки. В тех случаях, когда она должна быть предохранена от припаивания, ее поверхность хромируют с последующим окислением.

Молибден применяют главным образом благодаря малому температурному коэффициенту линейного расширения и достаточной прочности при высоких температурах. В тех же целях используется иногда ковар.

Для предохранения от припаивания молибден иногда хромируют, при этом его сцепление с покрытием непрочное, и поэтому оно быстро отслаивается.

Керамика может выдерживать любую атмосферу печи без окисления и раскисливания, не смачивается припоями, не обладает склонностью к спеканию.

Недостатками керамических материалов является склонность к растрескиванию при термоударах и трудность механической обработки.

Асбест является очень непрочным материалом, сильно загрязняет камеру печи. Как правило, эти материалы могут быть заменены приведенными ниже.

Приспособления из графитовых и угольных пластин удобны тем, что материал, из которого они сделаны, не подвергается короблению, легко обрабатывается. Однако при пайке стальных деталей возможно их науглероживание, в результате чего резко падает температура плавления стали и отдельные участки деталей оплавляются. Процесс науглероживания идет особенно интен-

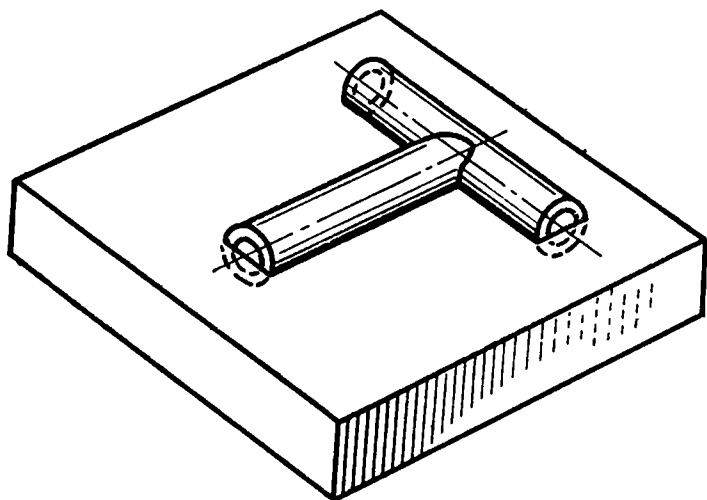


Рис. 15. Приспособление для пайки мелких трубок

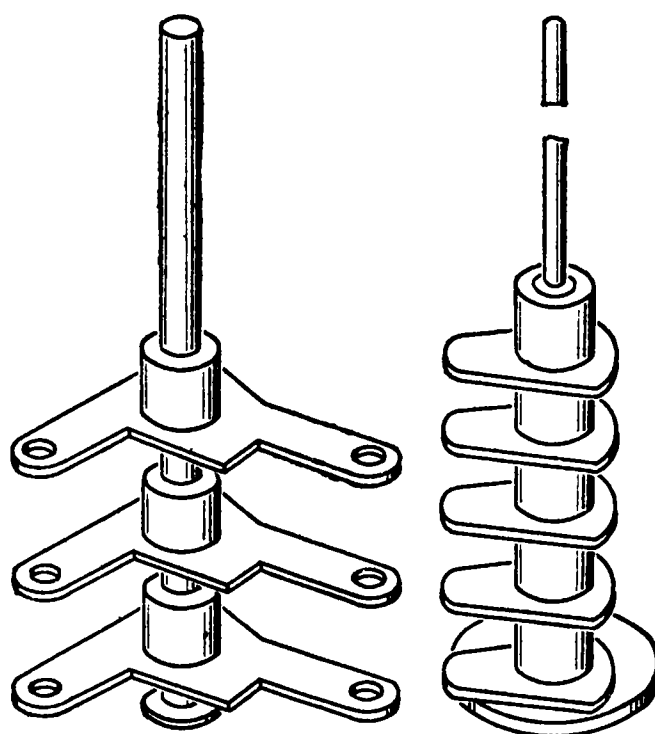


Рис. 16. Приспособление для пайки в виде штыря

сивно при пайке в вакууме. Науглероживание исключается, если на поверхность графита или угля положить тонкую асбестовую прокладку.

В качестве изолирующего материала используют силицированный графит объемного силицирования, обладающий термостойкостью до 2500°C . В сыром виде (до силицирования) графиту можно придать любую форму. Так, из графита ПГ-50 обычно изготавливают мелкие детали, а для изготовления крупных деталей может быть применен графит ПРОГ-2400.

Изготовленные детали из графита подвергают силицированию в высокотемпературных печах сопротивления или в индукционных печах при температурах $1700\text{--}2100^{\circ}\text{C}$ в атмосфере чистого азота с максимально допустимой примесью кислорода $0,3\text{--}0,5\%$.

Опыт работы показал, что применение силицированного графита вполне оправдано.

Благодаря высокой термостойкости силицированного графита, а также отсутствию газообразования при нагревании до температуры 1100°C его можно считать наиболее подходящим материалом для этой цели.

Фарфоровые детали, как показала практика, при температуре нагрева до 1100°C выдерживают всего лишь две-три пайки, затем поверхность остекляется, нарушая геометрию и размеры [7].

Конструкция приспособлений для пайки зависит от формы деталей. При пайке мелких трубчатых деталей при малых сериях можно рекомендовать приспособление, показанное на рис. 15 и представляющее собой огнеупорный кирпич, в канавки которого укладывают детали, или приспособление в виде штыря (рис. 16).

Одним из элементов оснастки являются подставки, которые используют для различных целей. На рис. 17 изображена многоместная подставка для печей, имеющих большую высоту рабочей зоны. Для предотвращения коробления полок подставки снабжены опорными дисками.

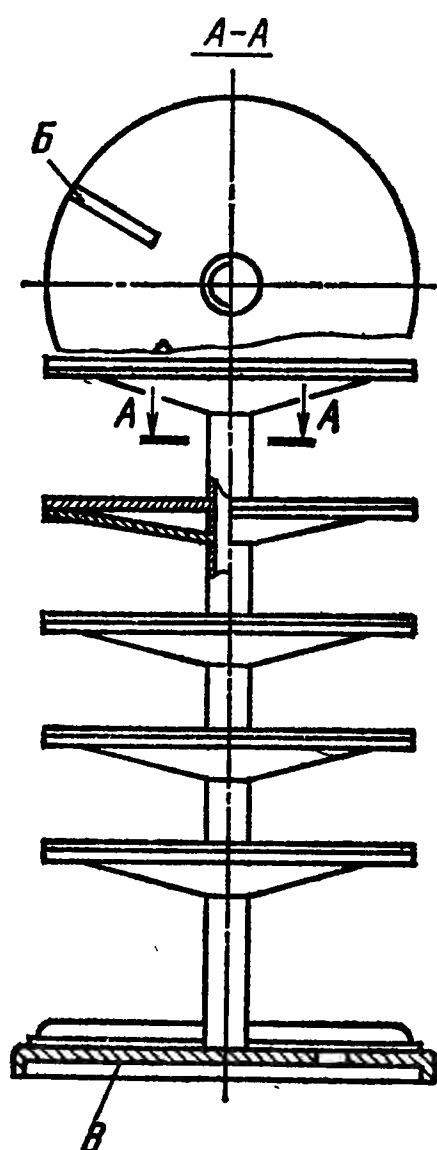


Рис. 17. Универсальная подставка для колпаковой водородной печи:

Б — отверстия для циркуляции газов; В — отверстия-гнезда для установки ножек приспособлений

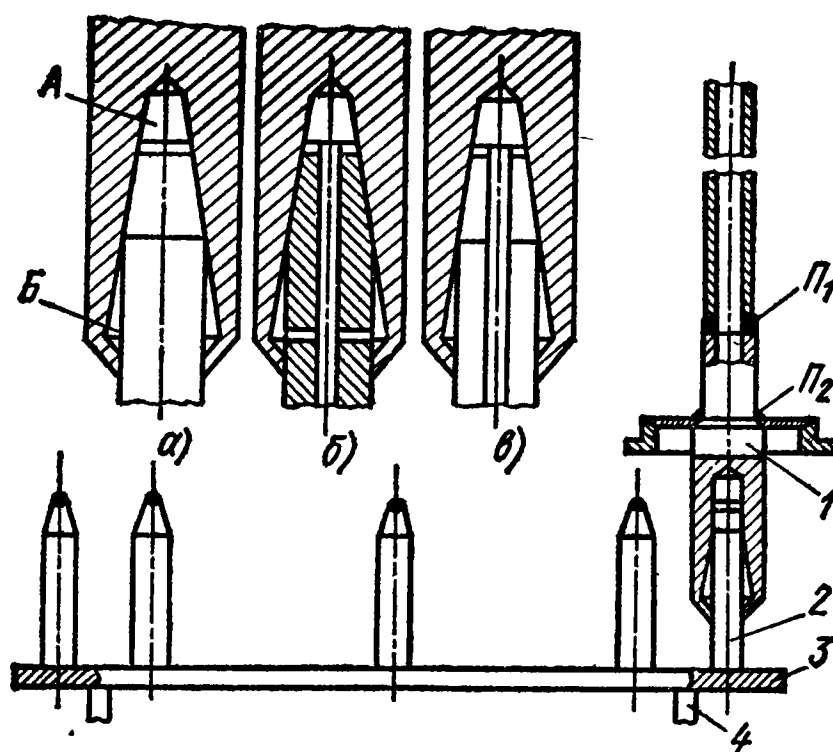


Рис. 18. Подставка для неустойчивых изделий:

1 — изделие; 2 — стойка; 3 — диск; 4 — штырь для установки в гнезда подставки; П₁ и П₂ — места пайки

Подставка для пайки неустойчивых изделий показана на рис. 18. В увеличенном масштабе показаны возможные виды сопряжения изделия и стойки подставки. На рис. 18, а приведен случай, когда остаются замкнутыми объемы А и Б, что может приводить к окислению деталей. На рис. 18, б и в показан случай, когда эти объемы легко продуваются через отверстия или шлицы.

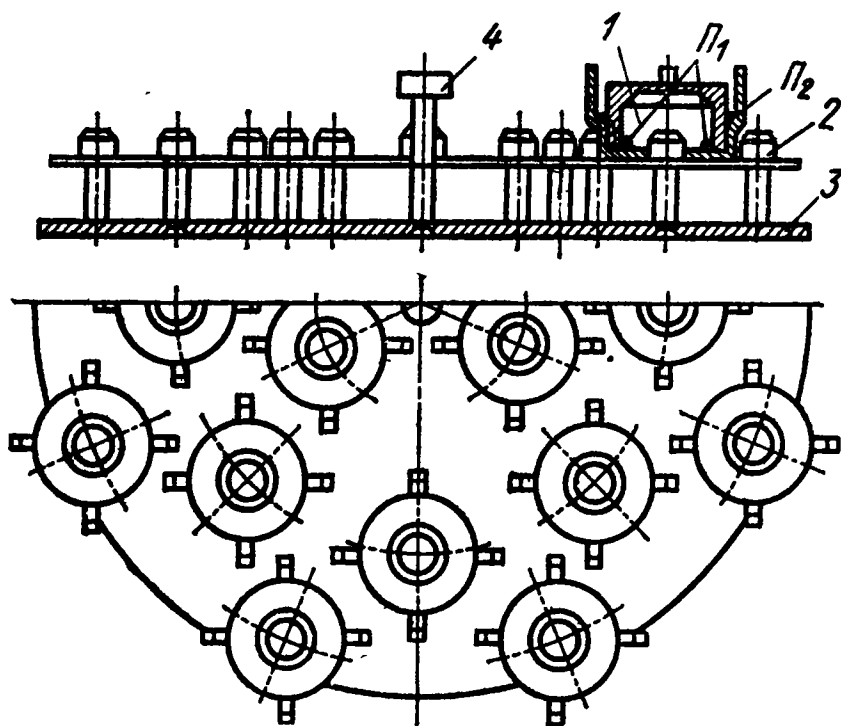


Рис. 19. Многоместная подставка для пайки простых узлов:

1 — изделие; 2 — опорная стойка; 3 — фланец; 4 — ручка для удобства установки и вынимания подставки; П₁ и П₂ — места пайки

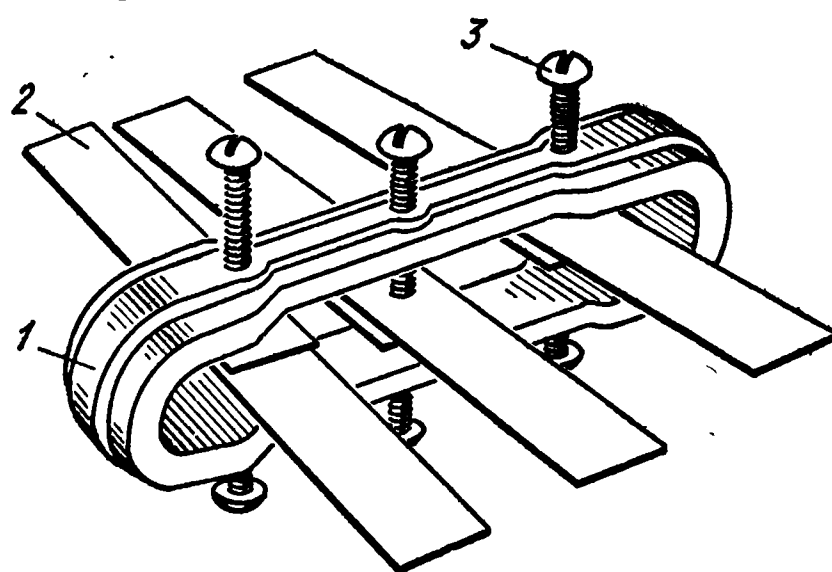


Рис. 20. Приспособление многоместное для пайки в печи плоских деталей

Многоместная подставка для пайки простых узлов изображена на рис. 19. Такая подставка позволяет расположить на ней детали в процессе сборки, транспортировать в универсальной таре, быстро устанавливать изделия в печь и извлекать из нее.

Многоместное приспособление для пайки в печи нескольких плоских деталей 2 дано на рис. 20. Оно представляет собой замкнутую металлическую скобку 1 с прижимными винтами 3.

При пайке в соляных ваннах пользуются приспособлениями, позволяющими производить одновременно пайку нескольких деталей (рис. 21).

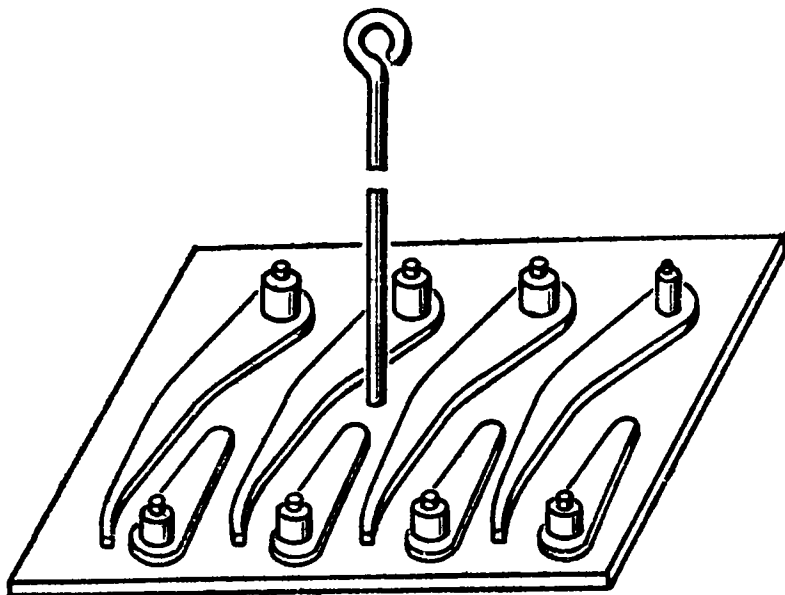


Рис. 21. Приспособление для пайки в соляных ваннах одновременно нескольких деталей

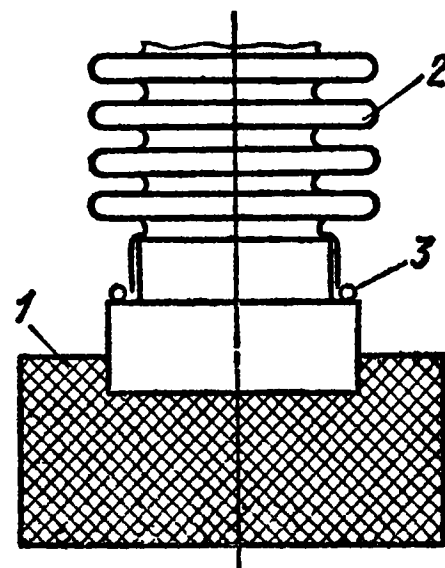


Рис. 22. Оправка для пайки деталей т. в. ч.:

1 — графитовая оправка;
2 — сильфон; 3 — припой

Графитовая оправка для припаивания сильфона из бериллиевой бронзы к арматуре (рис. 22) позволяет нагреть арматуру до температуры пайки, в то время как сильфон, кроме непосредственно примыкающего к арматуре гофра, нагревается до гораздо меньшей температуры.

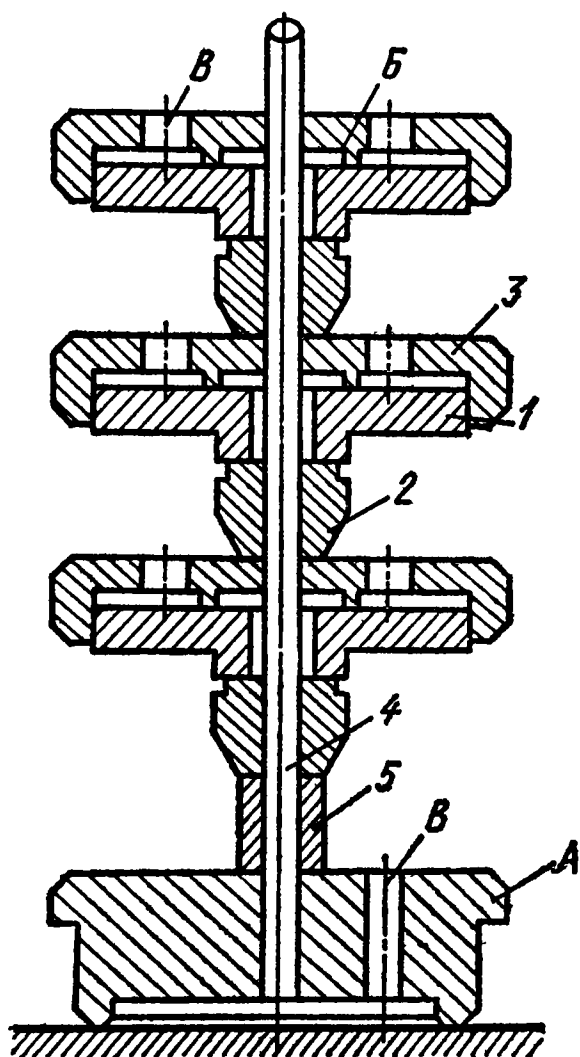


Рис. 23. Приспособление для точной центровки диаметров паяемых деталей:

1 и 2 — детали; 3 — центрирующий груз; 4 — стержень; 5 — втулка, обеспечивающая положение деталей в более равномерной температурной зоне; А — буртик для удобства поднятия узла; Б — буртик для уменьшения теплового контакта с грузом; В — отверстия для циркуляции газов

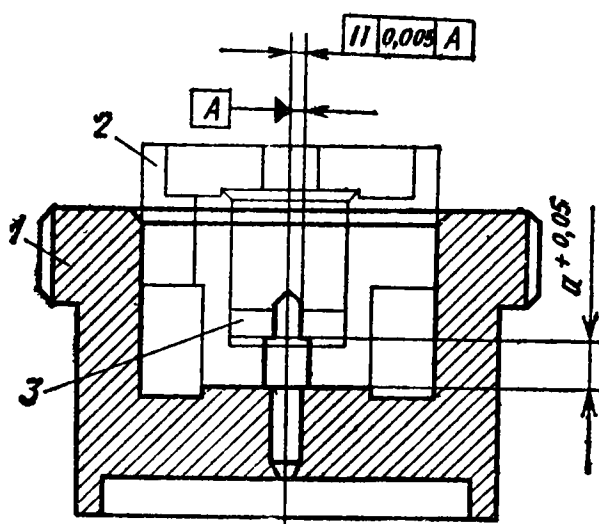


Рис. 24. Центрирующая оправка:

1 — оправка; 2 — полюсный наконечник; 3 — керамическая втулка

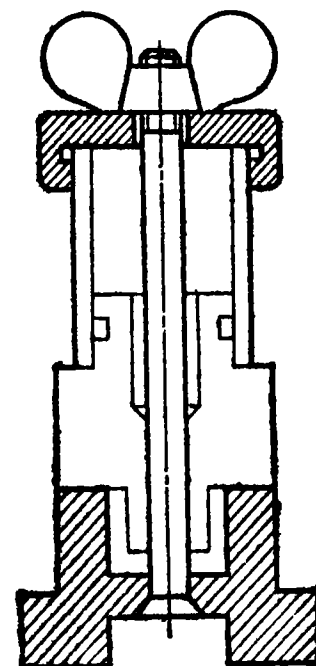


Рис. 25. Оправка с винтовым поджимом

Скрепляющие или сжимающие приспособления или грузы широко используют для взаимной фиксации деталей при сборке и в процессе пайки. Примеры использования простейших грузов, сжимающих детали по торцам, показаны на рис. 23.

Часто оправка должна обеспечивать не только сжимающее усилие, но и большую точность взаимного расположения паяемых деталей. В качестве примера на рис. 24 показана оправка для впаивания керамической втулки в полюсной наконечник на

определенной высоте. Оправка для пайки двух цилиндрических полых деталей, достаточно жестких в направлении сжимающего усилия, показана на рис. 25. В этом случае сжимающее усилие создается обычной резьбой. Материал таких оправок должен иметь температурный коэффициент расширения, равный или близкий коэффициенту расширения материала деталей.

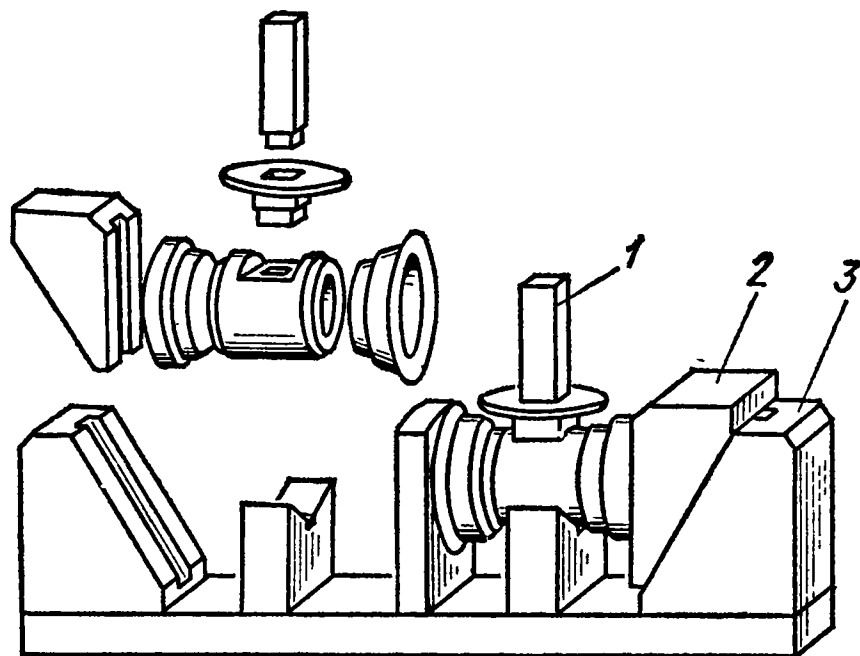


Рис. 26. Скрепляющее приспособление с клиновым зажимом:

1 — груз; 2 — скользящий клиновидный груз;
3 — неподвижная опора со скосами

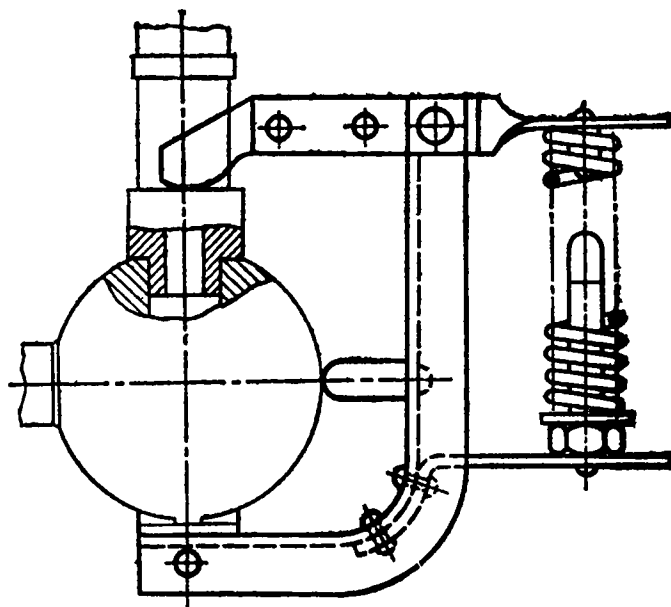


Рис. 27. Оправка с пружинным поджимом

Иногда необходимые при пайке сжимающие усилия обеспечивают за счет разности в температурных коэффициентах линейного расширения материалов оправки и паяемого узла. Так, если паяют детали из нержавеющей стали, то центральный стержень оправки может быть из молибдена.

Когда детали паяют по торцовым поверхностям, то для поджатия их обычно используют грузы или пневматические приспособления.

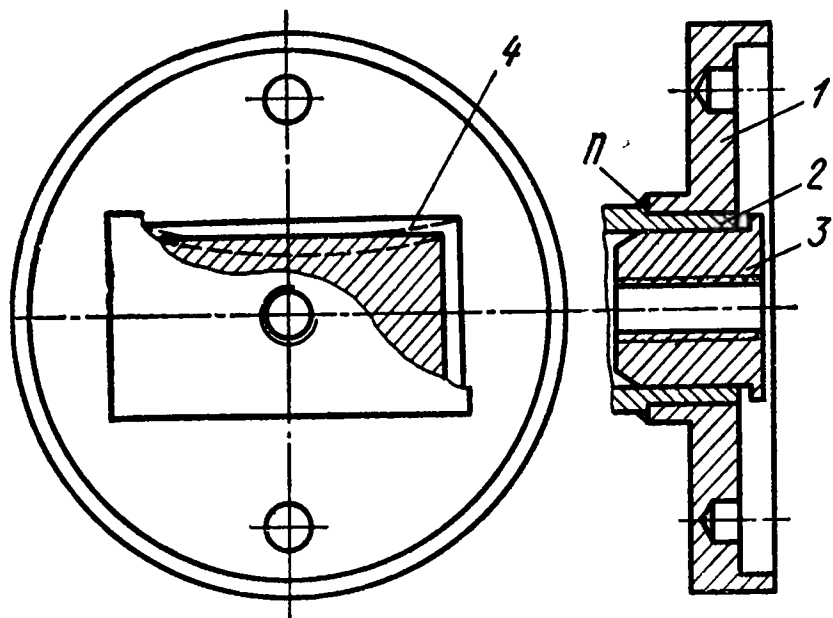


Рис. 28. Вкладыш, препятствующий короблению стенок медного волновода при пайке со стальными фланцами:

1 — стальные фланцы; 2 — медный волновод; 3 — вкладыш; 4 — форма волновода после пайки при отсутствии вкладыша;
П — место пайки

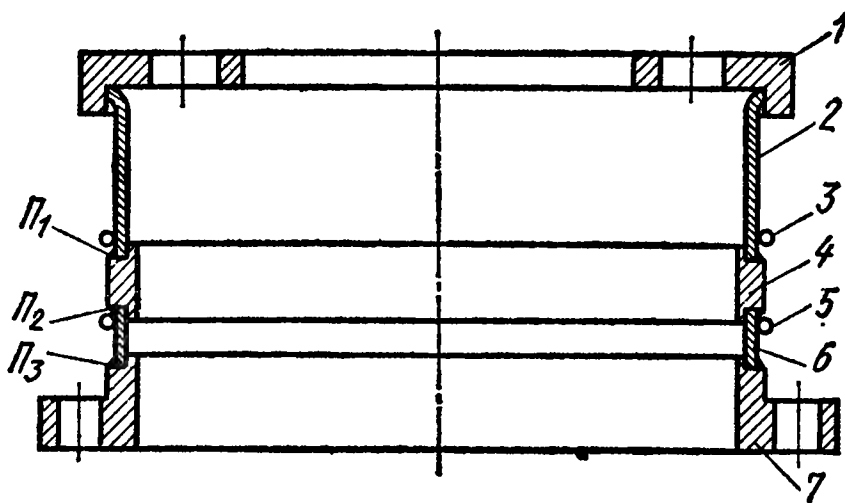


Рис. 29. Фиксатор, препятствующий возникновению эллипсности в коваровом стакане при пайке:

1 — фиксатор; 2 — коваровый стакан; 3 и 5 — нихромовая проволока, препятствующая растеканию припоя; 4 — стальное кольцо; 6 — никелевое кольцо; 7 — фланец; П₁ — П₃ — места пайки

На рис. 26 показано более сложное приспособление, в котором легкий фланец волновода прижимается обычным грузом, а скрепление деталей по торцам в горизонтальном направлении осуществляется за счет скольжения подвижного груза по скосу относительно неподвижной опоры.

Для создания необходимого усилия могут быть использованы молибденовые пружины. Примером такого рода оправки является приспособление для припаивания

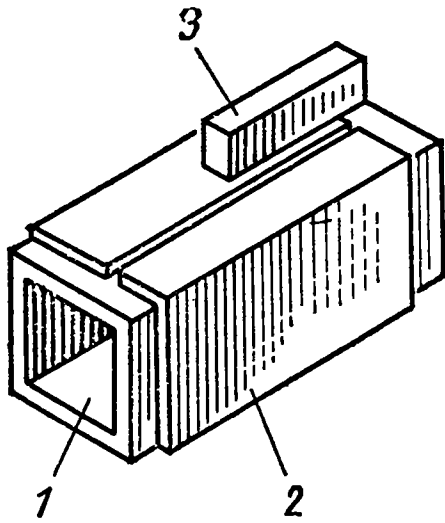


Рис. 30. Приспособление для пайки тонкостенных деталей:

1 — пустотелая оправка; 2 — деталь;
3 — металлический компенсатор

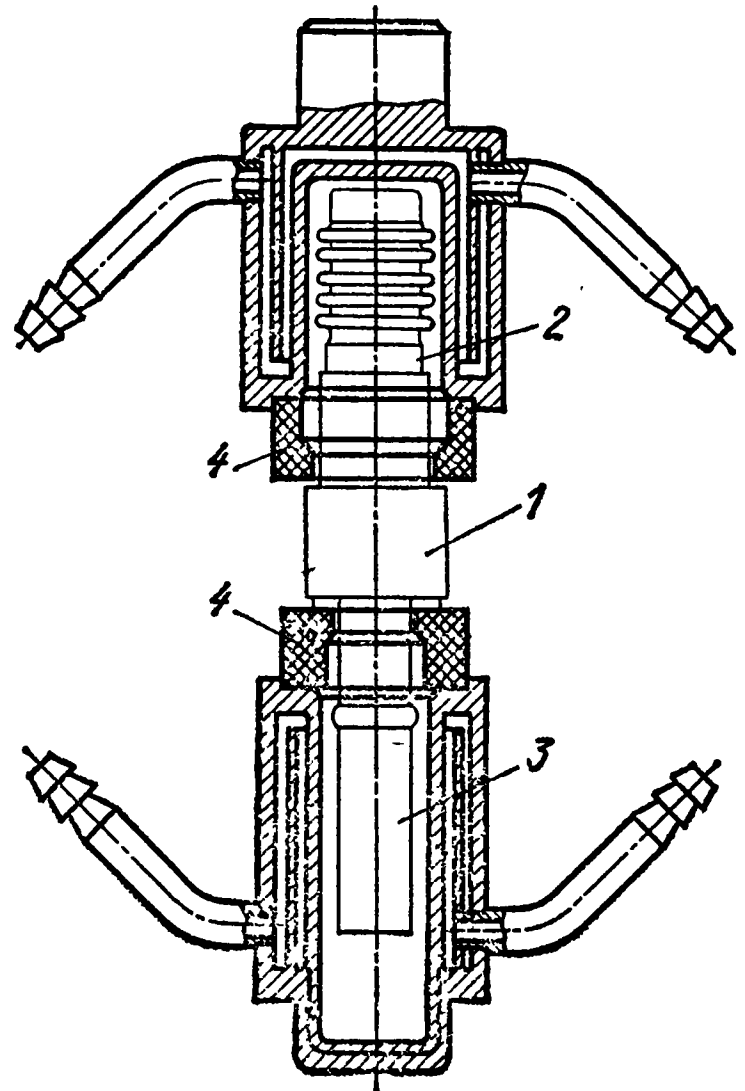


Рис. 31. Оправка с водоохлаждаемыми радиаторами:

1 — узел, подлежащий пайке; 2 — силифон;
3 — стеклянная трубка; 4 — электроды для пайки

узла вывода энергии к анодному блоку (рис. 27). Величину сжимающего усилия их подбирают так, чтобы не деформировать паяемые узлы. Остальные детали обычно выполняют из высокохромистых сталей, чаще всего марок 12X18H9T, 20X13.

При пайке деталей из материалов с различными температурными коэффициентами расширения применяют специальные вкладыши, ограничивающие коробление. На рис. 28 показан пример использования вкладыша при пайке прямоугольного медного волновода со стальным фланцем.

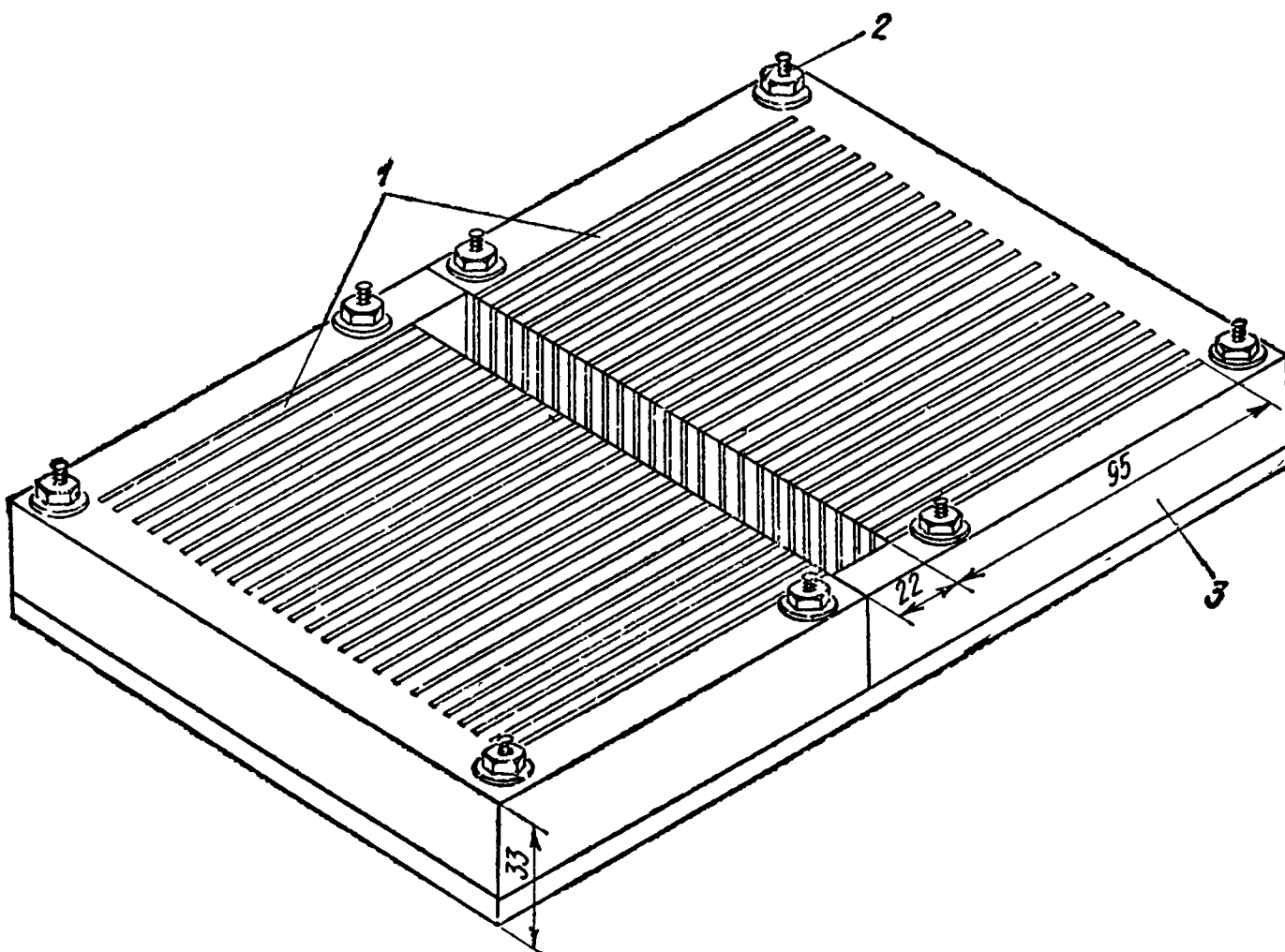


Рис. 32. Приспособление для пайки пластин методом заливки:

1 — асбоцементные гребенки; 2 — болты крепления; 3 — асбоцементная плита

Кроме того, деформации могут возникать вследствие снятия собственных напряжений (особенно в тонкостенных деталях), а также из-за неравномерного нагрева отдельных деталей узла. В таких случаях наряду с принятием мер, препятствующих неравномерному нагреву (экраны и др.), используют также фиксаторы, которые позволяют сохранять форму деталей. На рис. 29 приведен пример применения фиксатора, который препятствует возникновению эллипсности в коваровом стакане из-за снятия собственных напряжений.

Пайка тонких деталей представляет большую трудность ввиду того, что тонкая фольга быстро остывает, а сосредоточенный нагрев приводит к прожогам. Чтобы устранить указанные ненормальности, рекомендуется применять пустотелые оправки 1 и металлический компенсатор 3 (рис. 30).

При пайке нагревают изнутри оправку 1 до расплавления ранее нанесенного на деталь 2 флюса, после чего второй горелкой при непрерывном передвижении пламени производят пайку. Если на оправку под шов подкладывают асбестовую прокладку, то в этом случае пайку производят одной горелкой.

Иногда создание температурного перепада решается с помощью охлаждающих радиаторов. На рис. 31 [3] показан радиатор, предохраняющий сильфон и стеклянную трубку от перегрева при пайке его с корпусом прибора. Материал радиаторов и нагревательных оправок должен обладать высокой теплопроводностью, поэтому радиаторы чаще всего делают из меди, а оправки из графита. Хотя графит является хорошим материалом и для радиаторов, но он хрупок и негигиеничен, вследствие чего его применение следует ограничивать.

Паяное соединение может быть изготовлено методом заливки расплавленного припоя в приспособление с заложенными в него пластинами (рис. 32). Перед заливкой припоя приспособление нагревается. Во избежание образования трещин во время остывания затвердевание припоя производилось в термостатах с начальной температурой 200° С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асиновская Г. А. Газопламенная пайка металлов. М., Машгиз, 1963, с. 82—83.
2. Богиня С. Т. Сварка и пайка металлов. Рига, Рижский Краснознаменный институт инженеров гражданской авиации, 1968, с. 130.
3. Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. В. Пайка деталей электровакуумных приборов. М., «Энергия», 1967, с. 101—110.
4. Дьяченко П. Е. Отечественные работы по качеству поверхности. — «Станки и инструмент». М., Машгиз, 1950, № 4, с. 4—9.
5. Есенберлин Р. Е. Пайка металлов. М., Машгиз, 1959, с. 62—63.
6. Каспер М. А., Фридман М. Р., Леонович И. И. Пайка твердыми припоями в соляных ваннах. Минск, Изд-во ЦК КПБ, 1957, с. 20.
7. Ковалевский Р. Е., Чекмарев А. А. Оснастка для высокотемпературной пайки. — В кн.: Пайка металлов в производстве и перспективы ее развития. Сборник № 1. М., МДНТП, 1962, с. 74—91.
8. Куликов Ф. В., Лехцнер И. Р. Твердая пайка. М.-Л., Госэнергоиздат, 1959, с. 111—113.
9. Ладанов Ю. Н. Новый припой для пайки коллекторов электрических машин. — В кн.: Усовершенствование технологических процессов пайки. М., Филиал ВНИИТИ, 1959, с. 23—28.
10. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Пайка металлов. Машгиз, 1959, с. 165—182.
11. Льюис. Заметки по пайке. Баку, Объединенное издательство, 1958, с. 8—9.
12. Манко Г. Г. Пайка и припой. М., «Машиностроение», 1968, с. 182—185.
13. Маркова И. Ю., Алексеев А. С. Диффузионная контактно-реакционная пайка магния серебром. — В кн.: Пайка в промышленности. М., МДНТП, 1968, с. 41—46.
14. Пазюк Е. П. Применение пайки при изготовлении режущего инструмента. Л., Газетно-журнальное и книжное издательство, 1950, с. 35.
15. Руководство по пайке металлов мягкими припоями. М., Оборонгиз, 1963, с. 64—66.
16. Сланский А., Воллман Я. Капиллярная пайка. Под ред. З. В. Никифоровой. М., Машгиз, 1963, с. 116—135.
17. Справочник молодого паяльщика. М., «Высшая школа», 1969, с. 60—92.
18. Яковлев Н. Ф. Пайка, лужение и гальваническое покрытие. Минск, Госиздат БССР, 1962, с. 35—54.
19. Хряпин В. Е., Лакедемонский А. В. Справочник паяльщика. М., «Машиностроение», 1974, 327 с.

ПАЙКА УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Пайка низкоуглеродистых и низколегированных сталей не вызывает особых трудностей и может быть осуществлена всеми известными способами. Особенно легко протекает пайка низкоуглеродистых сталей. При пайке высокоуглеродистых сталей требуется лишь более тщательная подготовка соединяемых поверхностей [11].

Низкотемпературную пайку углеродистых и низколегированных сталей часто выполняют оловянно-свинцовыми припоями. В качестве флюса обычно применяют водные растворы хлористого цинка.

При пайке сталей мартенситного класса оловянно-свинцовыми припоями возможно возникновение трещин под действием расплавленного припоя. При этом наблюдается определенная закономерность: чем больше олова в применяемом припое и чем выше собственные напряжения в паяемом металле, тем большая вероятность возникновения в нем трещин в процессе пайки. Для устранения этого явления перед пайкой необходимо производить отпуск закаленных сталей. При сборке заготовок из таких сталей под пайку необходимо стремиться не создавать собственных напряжений и производить пайку припоями, содержащими не более 40% Sn.

При пайке сталей наиболее часто применяют оловянно-свинцовые припои: ПОССу 40-0,5; ПОС 61, олово. В соединениях, паянных этими припоями, на границе раздела припой — основной металл может образоваться прослойка хрупкой интерметаллидной фазы FeSn_2 , которая ослабляет шов. Не допускается перегрев припоя, так как это увеличивает толщину интерметаллидной прослойки, повышается пористость паяных швов и прочность соединений снижается.

Прочность паяных соединений во многом зависит и от технологического процесса пайки, зазора, применяемых флюсов и припоев. Наибольшую прочность имеют соединения стали, паянные припоем ПОС 40 и ПОС 61.

Низкотемпературные припои на основе цинка малопригодны для пайки углеродистых и низколегированных сталей из-за плохого смачивания, затекания в зазор и низкой прочности паяных соединений в результате образования на границе раздела хрупкой интерметаллидной прослойки [9].

Кадмиевые припои системы ($\text{Cd} - \text{Ag}$), состоящие из металлов, не образующих твердых растворов с железом, плохо растекаются при пайке сталей и не дают прочных соединений. Кадмиево-серебряные припои, легированные цинком, который активно взаимодействует с железом, обеспечивают более прочные соединения, чем припои системы $\text{Pb} - \text{Sn}$ или $\text{Pb} - \text{Ag}$. Например, прочность соединений стали 10, паянных припоем состава 82% Cd, 16% Zn и 2% Ag, составляет 16,0 кгс/мм².

Высокотемпературную пайку углеродистых и низколегированных сталей выполняют обычно медью, медно-цинковым и серебряными припоями. Медно-фосфористые припои применять для пайки сталей не рекомендуется, так как на границе со сталью они образуют хрупкие фосфиды железа, что придает паяным соединениям повышенную хрупкость и хладноломкость. Применение медно-фосфористых припоев возможно только для соединений, не работающих при вибрационных и динамических нагрузках, а также при низких температурах [1].

Для пайки низколегированных сталей возможно применение в качестве припоя чугуна. Для этого используют высокопрочные и пластичные модифицированные чугуны.

При пайке углеродистых и низколегированных сталей в качестве флюсов применяют буру, флюсы № 200, 201, 209, паяют также в газовых средах, в атмосфере водорода, диссоциированного аммиака, продуктов неполного сгорания смесей воздуха с газами: генераторным городским, пропаном и другими. Окисная пленка,

образующаяся на поверхности углеродистых и низколегированных сталей, химически нестойкая. Она легко восстанавливается в газовых средах и растворяется всеми флюсами, рекомендуемыми для пайки сталей. При пайке в контролируемых средах углеродистых и низколегированных сталей самым распространенным способом является пайка медью в печи с восстановительной атмосферой.

Соединения, паянные медью, более прочные, чем медь в исходном состоянии. Предел прочности при растяжении соединений стали Ст3, паянных медью в защитной среде, составляет 35 кгс/мм², а предел прочности литой меди 19—20 кгс/мм². Повышение прочности паяных швов, выполненных медью, обусловлено растворением железа в жидкой меди в процессе пайки. Необходимо учитывать, что медь и некоторые медные припои склонны к проникновению по границам зерен железа низкоуглеродистых и конструкционных сталей.

Нагрев при пайке термически обработанных низколегированных и углеродистых сталей в некоторых случаях приводит к отжигу, превращению остаточного аустенита в мартенсит, распаду мартенсита, к отпускной хрупкости. Поэтому при выборе температуры пайки и способа нагрева необходимо учитывать возможность развития этих процессов [11].

Способы нагрева, припои и флюсы для пайки сталей приведены в соответствующих разделах.

Низколегированные стали также можно паять всеми известными способами. Затруднения в процессе пайки встречаются только в тех случаях, когда легирующие элементы, например алюминий или хром, образуют на поверхности стали химически устойчивые окислы. В этом случае применяют более активные флюсы, а магнитные стали, содержащие алюминий, перед пайкой предварительно обрабатывают в растворе NaOH для удаления плотной пленки окислов алюминия. В качестве газовой среды при пайке используют азот или аргон в смеси с трехфтористым бором. При этом следует иметь в виду возможность поверхностного азотирования стали в процессе пайки, что при небольших толщинах (менее 1 мм) может привести к повышению прочности и снижению пластичности стали. При пайке закаленных низколегированных сталей следует иметь в виду возможность отжига в процессе пайки, и, следовательно, снижения их механических свойств. Во избежание этого пайку ведут при температуре высокого отпуска (620° С) с применением припоя ПСр 40 и флюсов № 284 или 209, которые обеспечивают получение высококачественных паяных соединений.

Возможен и другой вариант высокотемпературной пайки конструкционных сталей без снижения прочности основного металла. Для этого совмещают процесс пайки с закалкой и последующим отпуском. Такой технологический процесс дает возможность не только сохранить прочность основного металла, но и существенно повысить прочность паяных соединений.

ПАЙКА НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

В паяных конструкциях применяют стали: ферритные, легированные хромом; аустенитные и аустенитно-ферритные, легированные хромом и никелем; мартенситные и аустенитно-мартенситные, легированные ферритообразующими элементами — алюминием, титаном, молибденом и другими при малом содержании углерода.

На поверхности этих сталей образуются окислы, химически более стойкие, чем на простых сталях. При нагреве легированных сталей в вакууме на поверхности обнаружены только окислы типа шпинели ($\text{FeO} \cdot \text{Me}_2\text{O}_3$), при нагреве на воздухе обнаружено два вида окислов: Me_2O_3 и FeO . Окислы Me_2O_3 обогащены хромом, а на поверхностях сталей, значительно легированных хромом, образуются почти чистые окислы хрома.

В связи с высоким содержанием хрома поверхность этих сталей покрыта химически устойчивой окисной пленкой, состоящей в значительной части из труднорастворимых в обычных флюсах окислов хрома. Поэтому пайка нержавеющей сталей представляет значительные затруднения. Так, например, окисная пленка на нержавеющей сталях в газовых восстановительных средах восстанавливается при температуре около 1200° С, в то время как на обычных конструкционных сталях окисная пленка восстанавливается в водороде при температуре 900° С. Поэтому при пайке нержавеющей сталей часто используют трехфтористый бор в смеси с инертными газами,

который более активен и восстанавливает окислы при более низких температурах. При пайке этих металлов на воздухе необходимо выбирать наиболее активные флюсы. Так, при пайке припоями на медной или никелевой основе целесообразно использовать более тугоплавкие флюсы № 200, 201, а при пайке серебряными припоями наиболее качественные соединения получают с применением флюсов № 284 или 209.

При низкотемпературной пайке нержавеющей сталей оловянно-свинцовыми припоями обычные канифольно-спиртовые флюсы непригодны. Непригодны и канифольно-спиртовые флюсы с малыми добавками хлористого цинка и хлористого аммония.

В качестве флюса рекомендуется канифольно-спиртовой флюс с добавкой ортофосфорной кислоты (ЛМ1), состоящий из 100 мл ортофосфорной кислоты, 400 мл спирта или этиленгликоля и 30 г канифоли. Достоинством этого флюса является слабая его коррозионная активность и возможность применения при пайке в интервале температур 280—320° С. При температуре 350° С и выше происходит активное испарение кислоты, а спирт воспламеняется. При пайке с этим флюсом в диапазоне температур 200—300° С ортофосфорная кислота превращается в пирогосфорную H_4PO_7 . В температурном интервале образования пирогосфорной кислоты флюс наиболее активен. Удаление остатков флюса ЛМ1 после пайки можно производить тампоном, смоченным спиртом. Ввиду возможного испарения компонентов флюса нагрев необходимо производить быстро.

При пайке нержавеющей сталей оловянно-свинцовыми припоями в качестве флюса широко применяют водный раствор хлористого цинка. Для повышения активности хлористого цинка в него добавляют неорганические кислоты (HCl , HF , $HNNO_3$, H_3PO_4), хлористые соли (NH_4Cl) или хлористые соли тяжелых металлов, олова или меди [9,21].

При пайке нержавеющей сталей оловянно-свинцовыми припоями наиболее активен флюс, состоящий из 38—40%-ного водного раствора хлористого цинка (2 объема) и насыщенного раствора соляной кислоты (1 объем). Пайку нержавеющей стали можно осуществить после предварительной обработки в соляной кислоте и последующего использования водного раствора хлористого цинка.

Однако указанные флюсы можно успешно применять только при пайке паяльником или горелкой, когда за процессом можно наблюдать визуально и флюс в процессе пайки можно добавлять по мере необходимости.

При печной пайке введение в водный раствор хлористого цинка добавок кислот не способствует повышению его активности по отношению к нержавеющей стали при температуре пайки.

Активизирующее действие добавок проявляется только до температур кристаллизации флюсов, т. е. до расплавления припоя, причем активное действие флюсов повышается с ростом температуры растворов, а при температуре их кристаллизации активность флюсов не зависит от их состава.

Для печной пайки нержавеющей стали оловянно-свинцовыми припоями хороших флюсов не разработано. Флюсы на основе хлористого цинка с добавками кислот практически непригодны, поскольку при пайке в печи флюс не восполняется, а флюса, нанесенного перед пайкой, оказывается недостаточно. Кроме того, температурный интервал активного действия флюсов на основе хлористого цинка ограничен для нержавеющей стали только областью существования флюсов в виде раствора. В расплавленном состоянии флюсы практически не активируют поверхность нержавеющей стали и не защищают от кислорода воздуха.

Паяемость нержавеющей сталей облегчается за счет нанесения на сталь технологических покрытий, которые без затруднения паяются легкоплавкими припоями. В качестве таких покрытий используют медь, никель, серебро и другие металлы.

Растекание оловянно-свинцовых и других легкоплавких припоев по стали может быть значительно улучшено за счет предварительного лужения паяемой поверхности этими же припоями. Лужение производят с использованием активных флюсов путем последовательного погружения деталей во флюс и расплавленный припой. Припой можно наносить вручную на место пайки и лудить с помощью паяльника или горелки. Оловянно-свинцовые припои на нержавеющие стали можно наносить и гальваническим методом, после чего деталь флюсуют и нагревают в печи

до температуры пайки. После лужения остатки коррозионно-активных флюсов удаляют с поверхности путем кипячения или в проточной воде. Пайку луженых деталей можно производить с использованием канифольно-спиртовых флюсов, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость паяных соединений.

Высокотемпературную пайку нержавеющей стали производят серебряными, медными, никелевыми и другими припоями. Из серебряных припоев широкое распространение получили припои системы Ag—Cu (ПСр 72), Ag—Cu—Cd—Zn (ПСр 40, ПСр 45, ПСр 25).

Нержавеющие стали, содержащие ~18% хрома и легированные титаном, алюминием, кремнием, плохо смачиваются серебряными припоями (ПСр 72 и ПСр 72МЛН) в вакууме и аргоне. Некоторое улучшение растекания обнаруживается при легировании припоя ПСр 72МЛН титаном (0,12%) или цирконием (1%). Пайку нержавеющей стали припоем ПСр 72 производят в вакууме 10^{-3} мм рт. ст. по предварительно нанесенному барьерному слою меди или гальванического никеля. По непокрытой стали припой ПСр 72 плохо растекается и не затекает в зазор. При повышении температуры пайки до 1000°C и вакуума до 10^{-5} мм рт. ст. растекаемость не улучшается, а припой интенсивно испаряется. Покрытие химическим никелем в качестве барьерного слоя при пайке в вакууме припоем ПСр 72 не допускается, так как на границе раздела покрытие — основной металл образуются хрупкие интерметаллические фазы, что ослабляет паяные соединения. Особенно это проявляется при работе изделия в условиях низких температур или при динамических нагрузках, швы разрушаются хрупко.

При пайке газовой горелкой припой ПСр 72 плохо растекается по стали 12Х18Н10Т как с использованием флюса № 209, так и 200. Для улучшения смачивания и растекания припой ПСр 72 легируют литием (ПСр 72ЛМН).

Растекаемость серебряных припоев по нержавеющей стали можно улучшить введением в них никеля. Оптимальными свойствами обладают припои, легированные 3—5% никеля. Рекомендуется следующий состав припоя: 65% Cu, 30% Ag, 5% Ni. Температура плавления припоя $830\text{—}900^{\circ}\text{C}$ [11].

Кроме того, соединения нержавеющей стали, паянные серебряными припоями, не содержащими никеля, склонны к щелевой коррозии во влажной атмосфере. Щелевая коррозия не возникает при пайке серебряными припоями, содержащими 2—3% никеля.

Для пайки хромистых ферритных сталей рекомендуются припои следующих составов:

- 1) 40% Ag; 30% Cu; 28% Zn (температура растекания 783°C);
- 2) 40% Ag; 30% Cu; 25% Zn; 5% Cd (температура растекания 850°C);
- 3) 50% Ag; 15,5% Cu; 16% Cd; 15,5% Zn; 3% Ni (температура растекания 690°C).

При пайке нестабилизированных нержавеющей аустенитных сталей следует учитывать их возможную склонность к интеркристаллитной коррозии после нагрева в интервале температур $500\text{—}750^{\circ}\text{C}$. Поэтому пайка в интервале температур $600\text{—}800^{\circ}\text{C}$ не рекомендуется для таких сталей. Серебряные припои с температурой $620\text{—}800^{\circ}\text{C}$ применяют при пайке сталей, содержащих малое количество углерода или стабилизированных карбидообразующими элементами (Nb, Ti), устраняющими склонность их к интеркристаллитной коррозии после нагрева.

Пайка ферритных нержавеющей сталей (с 13% Cr) серебряными припоями не снижает коррозионной стойкости паяных соединений, так как эти стали склонны к интеркристаллитной коррозии только после закалки с температуры выше 900°C .

При пайке нержавеющей сталей припоем ПСр 25КН с флюсом № 209 наблюдается растрескивание. Поэтому припой ПСр 25КН непригоден для пайки тонкостенных изделий, от которых требуется герметичность, и для узлов, подвергающихся вибрационным нагрузкам. Для предупреждения при пайке сталей растрескивания необходимо следить за тем, чтобы в процессе нагрева детали не находились в напряженном состоянии. При этом нужно выбирать такие серебряные припои, которые не проникают по границам зерен основного металла. В этом случае принимают припой ПСр 40 с использованием флюса № 284.

Пайку припоем ПСр 40 можно производить газовой горелкой и нагревом в печи. При пайке в печи флюс № 284 или 209 в виде пасты замешивают на воде или спирте, наносят на места пайки и на предварительно уложенный припой. При пайке горелкой необходимо постоянное флюсование до образования галтели. Остатки флюса после пайки необходимо удалять путем кипячения в воде или в проточной горячей и холодной воде, так как они способствуют развитию коррозии.

Для высокотемпературной пайки нержавеющей стали в качестве припоев применяют также чистую медь или сплавы на ее основе. Достоинством медных припоев является то, что пайку ими осуществляют при температурах 950—1150° С. При температурах пайки выше 1000° С происходит отжиг стали и устраняются внутренние напряжения, что предотвращает опасность растрескивания основного металла в контакте с расплавленным припоем. Медь хорошо смачивает нержавеющую сталь в среде аргона с трехфтористым бором (BF_3). Для улучшения растекания по нержавеющей стали в аргоне медь легируют различными поверхностно-активными добавками: литием (0,15—0,3%); оловом (до 5%); марганцем, кремнием, титаном и др.

Для пайки нержавеющей стали в качестве припоев можно применять латуни. Они достаточно хорошо растекаются по стали и образуют прочные паяные соединения ($\sigma_{\text{в}} \leq 36 \text{ кгс/мм}^2$). Существенным недостатком этих припоев является то, что латуни в жидком состоянии проникают по границам зерен стали и способствуют хрупкому разрушению под напряжением. Эффект растрескивания сталей по границам зерен наиболее выражен при пайке т. в. ч. или в пламени газовой горелки, т. е. когда из-за неравномерного и быстрого нагрева создаются внутренние растягивающие напряжения. Вероятность образования трещин становится меньше при пайке латунью отожженной стали в печах или в солевых ваннах, где обеспечивается равномерный нагрев паемых деталей. Во всех случаях опасность образования трещин возрастает при повторной перепайке.

Следует также учитывать, что при пайке в печах происходит значительное испарение цинка из латуни и повышение температуры пайки.

Для пайки нержавеющей стали находят применение медномарганцевоникелевые припои ВПр2; ВПр4, легированные литием или бором. Припои ВПр2 и ВПр4 хорошо растекаются по сталям Х17Н5, Х18ДТ, НХ18Н10Т и Х15Н8М2Ю в среде проточного аргона. Эти припои слабо растворяют нержавеющие стали даже при выдержке 1,5 ч при температуре пайки [6].

Пайку деталей из нержавеющей стали 12Х18Н10Т можно произвести т. в. ч. на воздухе с использованием флюса № 200. Соединения стали 12Х18Н10Т, паянные припоями ВПр2 и ВПр4, кратковременно могут работать при температуре 600° С и обеспечивают более высокую прочность, чем серебряные припои.

Припои системы $\text{Cu} - \text{Ni} - \text{Si}$, например ВПр1, ПЖ45, можно применять при пайке нагартованных нержавеющей стали, а также для пайки конструкций, в материале которых могут возникнуть растягивающие напряжения. Предел прочности соединений стали 12Х18Н10Т, паянных припоем ВПр1, составляет 28 кгс/мм². Соединения, паянные припоем ВПр1 и ПЖ45, теплостойки до температуры ~700° С и хладостойки до температуры -196° С.

Для пайки нержавеющей стали можно применять припои на основе никеля системы $\text{Ni} - \text{Cr} - \text{Mn}$, $\text{Ni} - \text{P}$. Припоями $\text{Ni} - \text{Cr} - \text{Mn}$ можно паять в среде аргона с трехфтористым бором. При пайке в вакууме припоями, содержащими марганец, последний интенсивно испаряется, засоряет вакуумную систему, адсорбируется поверхностью, окисляется и затрудняет смачивание нержавеющей стали. Припои с широким интервалом кристаллизации системы $\text{Ni} - \text{Cr} - \text{Mn}$ плохо смачивают нержавеющую сталь и образуют пористые паяные соединения.

Припой системы $\text{Ni} - \text{P}$ наносят на сталь химическим методом. После нанесения химического никеля толщиной 25—100 мкм пайку можно производить в сухом водороде, аргоне или в вакууме при температуре 1000—1050° С. Соединения, паянные припоем $\text{Ni} - \text{P}$, прочные ($\sigma_{\text{в}} = 27 \text{ кгс/мм}^2$), однако швы отличаются низкой пластичностью и непригодны для конструкций, работающих при ударных и вибрационных нагрузках, и совершенно непригодны для работы при криогенных температурах. Они становятся ударнохрупкими уже при температуре -196° С.

ПАЙКА ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Припой, применяемые для пайки жаропрочных сплавов, должны обеспечивать необходимую жаропрочность и коррозионную стойкость. Так, в лопатках турбин реактивных двигателей, испытывающих значительные термические нагрузки, паяные соединения должны длительное время работать при температурах 850—900° С.

Трудности пайки жаропрочных сталей и сплавов обусловлены наличием на их поверхности прочных и плотных пленок, состоящих из окислов хрома, титана, алюминия и других элементов. Эти окисные пленки обладают высокой термической и химической стойкостью. Для удаления окисной пленки с этих материалов применяют высокоактивные флюсы и производят тщательную подготовку поверхности.

Подготовку к пайке соединяемых поверхностей производят наждачной бумагой, напильником, обезжиривают в парах органических растворителей, в горячих щелочных растворах или в электролитических ваннах.

Пайку жаропрочных сплавов, содержащих металлы с большим сродством к кислороду, например алюминий, титан, бор, рекомендуется производить в водородной среде с добавкой фторированной атмосферы. В этом случае в герметичный контейнер под изделие предварительно помещают фтористый аммоний в количестве 1 г на 1000 см³ объема контейнера. При нагреве фтористый аммоний разлагается на водород, азот и фтористый водород, при этом на поверхности деталей адсорбируются фториды, препятствующие окислению.

Флюсы, содержащие бориды и фтористые соли, плохо удаляют окислы хрома, поэтому они малопригодны для пайки жаропрочных сталей и сплавов. Более приемлемы флюсы, в состав которых входят тетраборат и фториды.

В качестве защитной атмосферы применяют сухие и очень чистые нейтральные газы (аргон, гелий, водород, водород в сочетании с парами галлоидных солей хрома или марганца, фторированную атмосферу). Пайку в этом случае производят в специальной камере. Под изделие помещают хлористые или фтористые соли хрома, марганца или других металлов. В верхней части камеры располагают гранулированный или порошкообразный хром, никель, марганец, железо, которые служат для регенерации паров металла в атмосфере. При нагреве соли выделяют соответствующие пары, которые препятствуют окислению паяемого металла и способствуют растеканию припоя [7].

Для высокотемпературной пайки жаропрочных сталей применяют серебряные припои. Припой с содержанием $\geq 72\%$ Ag применяют для пайки сталей в вакууме или инертных средах по предварительно нанесенному барьерному слою никеля или меди. Припоями с меньшим содержанием серебра паяют стали без покрытий с помощью т. в. ч. или газопламенного нагрева с флюсами № 209 или 284.

Медь в качестве припоя для жаропрочных сталей применяют редко из-за сильной ее диффузии в сталь и плохой растекаемости.

При пайке медью жаропрочных сплавов с большим содержанием никеля (сплавы типа ХН78Т) в печах медь в расплавленном состоянии активно взаимодействует с основным металлом, образуя более тугоплавкий, чем медь, сплав, который при температуре пайки плохо растекается по меди и не затекает в зазор. Применение припоев Л63, ЛОК 82-04-06 для пайки жаропрочных сплавов ограничено ввиду проникновения их по границам зерен и образования трещин в основном металле.

К медным припоям, обеспечивающим высокое качество паяных соединений, относят припои марок ВПр1, ВПр2 и ВПр4. Пайку этими припоями осуществляют всеми способами нагрева с использованием флюсов № 200 или 201. Пайку припоем ВПр1 можно производить при температуре 1180° С в среде аргона, гелия, аргон + трехфтористый бор или в вакууме без флюса, при этом обеспечивается высокая жаропрочность соединений до температуры 600° С. Припой ВПр4 является самофлюсующим ввиду присутствия в нем добавок натрия, лития, калия и фосфора. Припой ВПр4 может применяться при пайке жаропрочных сплавов в среде газообразных флюсов: аргон с фтористым водородом или аргон с трехфтористым бором при температуре 1050° С. Пайку сплава ХН77ТЮР припоем ВПр4 при быстром нагревании т. в. ч. или электросопротивлением можно производить без флюса [6].

Припои на основе серебра, меди или марганца не могут обеспечить кратковременной жаропрочности соединений, работающих при температурах 700—1000° С.

Не обеспечивают они достаточной жаропрочности и при длительном их нагружении. Так, например, соединения из сплавов Х20Н80Т, паянные при температуре 1050° С припоем на основе меди с содержанием 20% Мп и 19% Ni, имеют кратковременный предел прочности: при 500° С $\sigma_B = 27$ кгс/мм², а при 750° С $\sigma_B = 8$ кгс/мм². При температурах 800—900° С эти припои практически неработоспособны.

Соединения, полученные с применением припоев никель — марганец, серебро — марганец, при температуре испытания 800° С имеют $\sigma_B = 9$ кгс/мм², при длительном нагружении в этих условиях среднее время до разрушения при напряжении на срез 4 кгс/мм² составляет 27 ч.

Прочность при 800° С соединений, паянных припоем состава 75% Ag, 20% Pd, 5% Мп, ниже, чем соединений, паянных медными припоями.

Достаточной прочностью при высоких температурах обладают соединения жаропрочных сплавов, паянных припоями на основе никеля. Легирующими компонентами, способствующими повышению жаропрочности, служат хром, кремний, молибден и некоторые другие элементы.

Припои на основе никеля с добавками до 30% Cr хотя и обеспечивают необходимую жаропрочность, но имеют высокую температуру пайки. Для снижения температуры плавления хромо-никелевых припоев применяют бор, бериллий, кремний, германий, палладий, марганец. Все эти элементы, за исключением палладия и марганца, значительно понижают пластичность никелевых сплавов.

Для пайки жаропрочных сплавов широкое распространение получили припои системы никель — хром — бор (бериллий, кремний). Эти припои используют в виде порошков или паст, приготовленных на органической связке. В качестве связки служит акриловая смола или толуол, которые сгорают в процессе пайки, не оставляя шлама. Припои хорошо растекаются по жаропрочным сплавам в среде аргона, гелия, или в вакууме 10⁻³ мм рт. ст. Соединения обладают высокой жаропрочностью и коррозионной стойкостью, однако пластичность их низкая. Длительный отжиг, который совмещают с процессом пайки, повышает пластичность соединений за счет диффузии бора, бериллия и кремния в паяемый металл. В процессе пайки возможно значительное растворение основного металла в припое, особенно, когда между ними образуются легкоплавкие фазы. При пайке жаропрочных сплавов припоями, содержащими бор, происходит значительное растворение основного металла и проникновение припоя по границам зерен. Поэтому эти припои непригодны для пайки тонкостенных конструкций.

В зарубежной литературе для пайки жаропрочных сплавов приводится ряд припоев на основе никеля.

1. «Кольманой 6»: 72% Ni; 15% Cr; 4% Fe; 3,75% P; 4,5% Si; 0,45% C; температура плавления 1010—1070° С.
2. «Никробрейз»: 70,5% Ni; 16,5% Cr; 4% В; 4% S; 1,0% C; 4% Fe; температура плавления 1010—1070° С.
3. «Сольбрейз»: 60—85% Ni; 20% Cr; до 30% Мп; 0,6—2% Si; 3% В; температура плавления 950—1070° С.

Например, соединения стали 37Х12Н8Г8МФБ в атмосфере водорода при температуре 1175° С, паянные припоем «Кольманой 6», обеспечивают предел прочности $\sigma_B = 24$ кгс/мм² при температуре 700° С в течение 112 ч.

При пайке сплавов типа ХН77ТЮР эти припои активно растворяют основной металл и проникают по границам зерен. Пластичность соединений, паянных этими припоями, можно повысить путем отжига в вакууме или аргоне при температуре ниже температуры пайки на 100—150° С. При этом повышаются прочность соединений и температура распая за счет испарения и диффузии в основной металл ряда компонентов. Соединения, паянные этими припоями, могут работать до температуры 800° С.

Например, для пайки газовых турбин за рубежом применяют припой следующего состава 36% Ni; 10% Cr; 54% Мп, имеющий температуру плавления 1086—1170° С. Для улучшения растекания в припой этой системы вводят Fe, Cu, Si и В. Для повышения жаропрочности и коррозионной стойкости вводят Al, Ti, Mo, Nb, а для придания им самофлюсующих свойств вводят Li, K, Na. Пайку производят в аргоне, в смеси аргона с фтористым водородом или трехфтористым бором, или в вакууме 10⁻⁴ мм рт. ст.

Припой этой системы значительно меньше растворяют основной металл и меньше проникают по границам зерен по сравнению с высоконикелевыми припоями с бором. Эти припои применяют для пайки теплообменников, деталей ракетных и реактивных двигателей, плакированных нихромом или другими металлами.

В зарубежной практике для пайки жаропрочных сплавов получили распространение припой системы Ni—Cr—Pd, например, припой состава 44,3% Ni; 54,9% Pd; 0,49% Si; 0,25% Вe с температурой плавления 1115—1160° С. Палладий снижает температуру пайки, увеличивает растекаемость, уменьшает проникновение по границам зерен, а также позволяет паять соединения с большими зазорами. Припой хорошо смачивает жаропрочные сплавы, содержащие титан и алюминий, при пайке их в контролируемых атмосферах или в вакууме.

Весьма жаропрочными являются соединения, паянные припоями системы Ni—Ta, Fe—Ta, Co—Si, Ni—Mo, Ni—Cr, Ni—Pd с температурой пайки 1200—1400° С. Применение этих припоев ограничивается из-за высокой температуры пайки.

Низкотемпературную пайку оловянно-свинцовыми припоями жаропрочных сталей и сплавов производят редко. Пайку осуществляют паяльником, газопламенным нагревом или погружением в расплавленный припой. В качестве флюсов применяют водный раствор хлористого цинка с добавками соляной кислоты, раствор ортофосфорной кислоты или комплексные флюсы. Канифольные флюсы недостаточно активны для пайки жаропрочных сталей, однако ими можно пользоваться при пайке луженых поверхностей.

Основные способы пайки, флюсы и припои для жаропрочных и нержавеющей сталей приведены в табл. 1.

1. Пайка изделий из жаропрочных жаростойких и нержавеющей сталей

Способ пайки	Припой	Флюс
Паяльником, газопламенными горелками, погружением в расплавленный припой	На оловянной и свинцовой основах по барьерному слою никеля или меди и без покрытия Ag—Cu Ag—Cu—Zn—Cd Ag—Cu—Pd Cu—Cu—Zn Cu—Ni—Mn	1. Водный раствор хлористого цинка с добавками соляной кислоты. 2. Ортофосфорная кислота со спиртом и канифолью
В соляных ваннах газопламенными горелками, т. в. ч.	Бура, борная кислота и их смеси (№ 209, 284)	
В печах с контролируемой атмосферой	1. Cu—Ni—Mn—Fe 2. Cu—Ni—Mn (Fe, Co, B, Si) 3. Ni—Cr—Pd 4. Ni—Cr—Fe—B—Si 5. Ni—Cr—Mn (Be, Si)	1. Флюсы № 200 и 201. 2. Защитно-восстановительные среды: Ag + BF ₃ ; Ag + HF; водород; вакуум 10 ⁻⁴ мм рт. ст.

ПАЙКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Инструментальными называют высокоуглеродистые стали, содержащие 0,6—1,2% С. Для повышения теплостойкости инструментальных сталей их легируют вольфрамом (до 18%), хромом (до 5%), ванадием (до 4%) и другими элементами. Инструментальные стали подвергают закалке с температур 1200—1300° С с последующим отпуском при температурах 560—580° С или обработкой холодом. Быстро-режущие стали припаивают к корпусу инструмента из конструкционных сталей в указанном интервале температур с применением высокотемпературных никелевых припоев. Такие стали можно паять всеми способами с учетом технологических рекомендаций по пайке конструкционных сталей и чугуна.

Для снижения внутренних напряжений в шве наряду с применением припоев с более низкой температурой плавления и компенсационных прокладок корпус инструмента изготавливают из стали типа 30ХГСА, которая после пайки и закалки на мартенсит почти вдвое снижает напряжения в твердосплавном инструменте в срав-

нении с напряжением, возникающим в инструменте с корпусом из стали У7 со структурой перлита. Это объясняется тем, что при превращении аустенита в мартенсит сталь 30ХГСА несколько увеличивается в объеме, что снижает ее суммарное сужение при охлаждении после пайки [8].

При ремонте инструмента из высокоуглеродистых инструментальных сталей и при изготовлении биметаллического составного инструмента (например, резцов, сверл, фрез и долбяков и т. д.) часто пользуются пайкой тугоплавкими припоями. В этом случае соединяют пайкой рабочую часть инструмента из быстрорежущих сталей с державкой из среднеуглеродистых легированных сталей типа 40Х или инструментальных сталей типа У7.

Пайку высокоуглеродистых и инструментальных сталей как между собой, так и с другими металлами, кроме алюминиевых, магниевых и жаропрочных сплавов, осуществляют чаще всего медью, медно-цинковыми и серебряными припоями.

Перед пайкой соединяемые поверхности очищают от грязи, масла и собирают с соответствующим зазором, который определяют для каждого случая в зависимости от метода нагрева и коэффициента расширения паяемых металлов. Инструментальные стали паяют в соляных ваннах, пламенной печи, нагревом т. в. ч. и газопламенными горелками.

В соляной ванне паяют при температуре 1150—1200° С. После пайки инструмент до 900—1000° С охлаждают на воздухе; дальнейшее охлаждение до 500—560° С производят в ваннах следующего состава (% по массе):

1. Хлористый барий	30	2. Хлористый натрий	24
» натрий	22	» кальций	76
» кальций	48		

После пайки изделие охлаждают на воздухе до комнатной температуры, затем промывают водой до полного удаления солей с поверхности.

Для печной пайки применяют обычно пламенные двухкамерные печи, имеющие камеру предварительного подогрева и камеру пайки. Пайку производят в следующем порядке:

1) пластинку из быстрорежущей стали устанавливают в соответствующий паз державки или корпуса и наносят флюс;

2) помещают заготовку инструмента в камеру предварительного нагрева (температура камеры 750—800° С);

3) после выдержки (время зависит от размеров инструмента) заготовку вынимают из камеры, укладывают в зону пайки припой, покрывают припой и зону соединения флюсом, устанавливают на керамическую подставку и помещают в камеру пайки;

4) после заполнения шва припоем заготовку вынимают из печи и охлаждают до комнатной температуры;

5) отпуск осуществляют при температуре 560° С, после чего инструмент очищают и проверяют качество пайки.

С нагревом т. в. ч. можно паять многие типы инструмента, но чаще всего этот метод применяют для пайки (с целью удлинения инструмента или его ремонта) сверл, зенкеров, разверток, метчиков.

Для инструмента диаметром до 7 мм применяют соединение внахлестку с косым срезом; пайку осуществляют с помощью соединительной втулки. Изделие в этом случае располагают горизонтально и припой с флюсом помещают в специальное гнездо втулки. После пайки инструмент помещают в печь для снятия напряжений и дополнительного отпуска. Температура печи 560° С.

Пайку инструмента с конусным соединением осуществляют в следующем порядке:

1) в специальное гнездо удлинителя помещают припой и флюс, после чего инструмент собирают под пайку;

2) инструмент устанавливают в индукторе вертикально, чтобы место соединения находилось в зоне нагрева индуктора, установку производят на центрах;

3) во время нагрева инструмент необходимо равномерно вращать;

4) после охлаждения инструмент снимают с центров и помещают в печь для снятия напряжений и дополнительного отпуска.

Пайка с помощью газопламенного нагрева рекомендуется только для термически обработанных стержневых инструментов диаметром не более 10 мм. Рихтовку инструмента производят в горячем состоянии на участке соединения.

Для пайки инструмента из быстрорежущей стали наиболее часто применяют припой ГФ, ГФК, ГПФ, в качестве флюсов используют буру, буру с добавками ферромарганца, фтористого калия или борной кислоты.

ПАЙКА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Металлокерамические твердые сплавы состоят из карбидов вольфрама, титана, тантала и кобальта. Твердые сплавы изготовляют методом прессования из смеси тонкоразмолотых порошков карбида и металла с последующим спеканием в защитной атмосфере при температуре 1400—1600° С. По ГОСТ 3882—74 отечественная промышленность выпускает три типа металлокерамических твердых сплавов: вольфрамовые, титано-вольфрамовые и титано-тантало-вольфрамовые.

Приготовленные методом спекания пластинки твердого сплава припаивают к корпусу инструмента, изготовленного из углеродистой стали. Коэффициент линейного расширения применяемых сталей в 2—3 раза больше коэффициента линейного расширения твердого сплава. Это обстоятельство требует, чтобы нагрев и охлаждение твердосплавного инструмента при пайке происходили равномерно, в противном случае на пластинах твердого сплава образуются трещины. Влияние разности коэффициентов линейного расширения стали и твердого сплава снижают применением компенсационных прокладок, изготовленных из сплава железа с никелем (45% Ni) и устанавливаемых при пайке между двумя соединяемыми материалами.

Перед пайкой пластинки твердого сплава очищают песком и шлифуют по опорным плоскостям абразивными кругами. Подготовленные для пайки пластинки не должны иметь трещин, расслоений и посторонних включений. В корпусе инструмента фрезеруют паз по конфигурации пластинки, куда устанавливают для припайки предварительно обезжиренную и очищенную пластину. Паз под пластинку должен быть ровным, не иметь завалов, ступенек и заусенцев. Пластина должна быть хорошо пригнана к основной грани паза и не качаться при нажатии.

Во избежание выпадения пластины из паза во время пайки их предварительно закрепляют. Крепление проволокой неудобно тем, что она всегда припаяется к корпусу и требует для своего удаления дополнительной механической обработки. Кроме того, проволока нагревается быстрее твердого сплава, что приводит к образованию трещин в местах касания пластин с проволокой; поэтому такой метод крепления применяют очень редко. Закрепление пластин чекашкой и клиньями иногда приводит к поломке хрупких пластин твердого сплава.

Наиболее приемлемым способом считают закрепление пластин при помощи компенсационных прокладок различной толщины и технологической стенки. При контактной пайке или при пайке нагревом т. в. ч. применяют различные приспособления для крепления и прижима пластины твердого сплава к державке.

Металлокерамические твердые сплавы можно паять методами электросопротивления, нагревом т. в. ч., в печах с восстановительной средой и погружением в расплавленный припой.

Пайка инструмента электросопротивлением состоит в том, что подготовленную под пайку пластину вставляют в корпус инструмента, который зажимают между контактами сварочной машины. Перед включением тока пластину посыпают порошком флюса, сверху кладут припой, который также покрывают флюсом. Для того чтобы не происходил перегрев, ток в процессе нагрева включают периодически. Во время расплавления флюса следят за тем, чтобы он был в достаточном количестве и смачивал соединяемые поверхности, в противном случае флюс добавляют. В момент начала расплавления припоя ток выключают и дают возможность припою растекаться по пластине и заполнить шов. Пластину поджимают к державке до температуры 800° С, затем давление снимают до момента прекращения растекания припоя и продолжают прижимать до полной кристаллизации припоя.

При пайке с нагревом т. в. ч. большое значение имеет правильный выбор формы и размеров индуктора. Последовательность пайки: в паз державки вносят небольшое количество флюса, укладывают компенсационную прокладку, покрывают ее тем же флюсом, после чего укладывают пластину. На пластину в зоне соединения с державкой помещают припой, который также покрывают флюсом. Собранный так инструмент помещают в индуктор. Ток включают периодически. Скорость нагрева для лучшего смачивания припоем и уменьшения окисления пластины и перегрева стали державки должна быть строго определена и составляет $30^{\circ}\text{C}/\text{с}$ для инструмента с поперечным сечением до 150 мм^2 и $60^{\circ}\text{C}/\text{с}$ для инструмента с поперечным сечением до 1000 мм^2 .

При пайке твердосплавного инструмента важным условием получения качественного соединения является обеспечение равномерного нагрева. Для этой цели инструмент помещают в индуктор так, чтобы в первую очередь нагреть корпус инструмента и за счет теплопроводности прогреть пластину твердого сплава. После прогрева для выравнивания температуры инструмент передвигают и производят нагрев места пайки. Во время пайки положение керамической пластины в пазу поправляют (если нет зажимного приспособления) фарфоровой или асбестовой палочкой. Керамические инструменты охлаждают в печи или на спокойном воздухе, для чего их укладывают на кирпичные, асбестовые, керамические и другие подставки. При охлаждении в печи инструменту дают отпуск при температуре $200\text{—}250^{\circ}\text{C}$ в течение 6 ч.

В результате нагрева изделия при пайке твердость корпуса инструмента снижается, в связи с этим он нуждается в дополнительной термообработке. Если требуется закалка, то ее производят сразу же после пайки. Для предотвращения появления трещин на пластинах их закаливают в среде с температурой $260\text{—}320^{\circ}\text{C}$.

Пайку металлокерамического инструмента можно осуществить в печи с восстановительной атмосферой, при этом вольфрамовые пластины на сталь 45 напайвают без флюса, а титанокарбидовые требуют применения высокоактивных флюсов независимо от того, на какую сталь их напайвают. Трудность печной пайки в основном сводится к креплению пластины к корпусу инструмента. Наиболее рациональным способом крепления при этом методе пайки является обвязка головки инструмента шнуровым асбестом с предварительным размещением компенсационной прокладки, припоя и флюса. Пайку металлокерамического инструмента погружением в расплавленный припой обычно используют для совмещения пайки с термообработкой корпуса. Процесс пайки-закалки состоит из трех основных операций: предварительного нагрева в соляной ванне до температуры $800\text{—}850^{\circ}\text{C}$, пайки погружением в расплавленный припой и закалки инструмента. Предварительный нагрев осуществляют в ванне следующего состава (%):

Хлористый барий 70, хлористый натрий 30

Закалочной средой для сплавов марок ВК8 и Т15К6 служит смесь солей состава (%):

Едкое кали 70, едкий натр 30

Температура ванн соответственно $260\text{—}280$ и $380\text{—}400^{\circ}\text{C}$. Для сплава Т15К6 после основной закалки требуется дополнительная закалка в нагретой до $180\text{—}200^{\circ}\text{C}$ селитре.

При пайке погружением требуется тщательное крепление металлокерамической пластины и обработка собранного под пайку инструмента в кипящем насыщенном водном растворе буры (для вольфрамовых пластин) или в растворе с 35% фтористого калия (для титанокарбидных пластин).

Учитывая резкое различие коэффициентов теплового расширения соединяемых материалов, пайку твердосплавного инструмента нельзя вести при высоких температурах. Наилучший результат, т. е. наибольшая долговечность инструмента, достигается при пайке серебряными припоями, легированными для теплостойкости никелем или марганцем, однако из-за дефицитности серебряные припои применяют редко.

Наибольшее распространение получили медно-цинковые припои типа латуни Л63, легированной для повышения теплостойкости небольшими добавками никеля, марганца или алюминия, обеспечивающими высококачественные соединения. В качестве флюса обычно употребляют буру или буру с добавками ферромарганца, фтористого калия или борной кислоты [8].

ПАЙКА ЧУГУНА

Чугуны разделяют на белые, серые, легированные, специальные и высокопрочные. Основная трудность при пайке чугуна — наличие в его структуре графита, затрудняющего смачивание поверхности основного металла расплавленным припоем. Для удаления графита обычно применяют пескоструйную обработку с последующим выжиганием графита окислительным пламенем газовой горелки или удаление его путем электрохимической обработки в соляной ванне при 450—510° С.

При низкотемпературной пайке чугуна оловянно-свинцовыми или другими легкоплавкими припоями паяемые поверхности можно подготовить путем обработки флюсом № 209 или 284 при температуре 600—700° С или электрохимически в соляной ванне, а затем обезжирить бензином, ацетоном или раствором щелочи. Пайку нужно производить паяльником или газовой горелкой с использованием флюсов на основе хлористого цинка. Наиболее просто пайку чугуна осуществляют при использовании флюсов на основе хлористого цинка с добавками хлористых солей меди и олова. Для облегчения пайки легкоплавкими припоями применяют гальваническое лужение или контактное меднение в растворе медного купороса.

Высокотемпературную пайку чугуна производят припоями на основе меди, например латунью, иногда применяют серебряные припои, которые содержат никель, имеют сравнительно низкие температуры плавления и образуют прочные паяные соединения. При высокотемпературной пайке чугуна более целесообразно применять такие активные флюсы, как № 209 и 284, которые растворяют графит на поверхности чугуна в процессе пайки и благодаря этому обеспечивают надежное смачивание припоем соединяемых поверхностей. Главное преимущество пайки чугунов серебряными припоями с флюсом № 209 или 284 в том, что нет необходимости принимать меры по удалению графита, а также и в том, что при пайке серебряными припоями при температуре до 900° С чугун не перегревается. Перегрев чугуна связан со структурными превращениями, что при охлаждении ведет к выделению хрупкого цементита. Поэтому применение меди для пайки чугунов следует ограничивать ввиду высокой температуры ее плавления. Припои, содержащие фосфор, не применяют вообще из-за образования в швах хрупких железо-фосфорных соединений.

Нагрев при пайке чугуна можно производить газовой горелкой или паяльной лампой до температуры не выше 900° С. При этом пламя должно быть только нейтральным.

Для снятия внутренних напряжений и упрочнения паяных соединений чугунные изделия сразу же после пайки подвергают отжигу при температуре 700—750° С в течение 20 мин. Пайку в печах с контролируемой атмосферой производят с флюсом, который улучшает смачивание основного металла и затекание припоя в зазор [11].

Пайку дефектных участков (усадочных раковин, пор и трещин) чугунных литых деталей осуществляют с применением оловянно-свинцовых припоев. Чаще всего применяют припой ПОС 30 с использованием в качестве флюса водного раствора хлористого цинка с добавками хлористых солей меди и олова. Паяют после механической зачистки и лужения соединяемых поверхностей.

Последовательность лужения:

- 1) места пайки очищают от литейной корки проволоочной щеткой;
- 2) очищенную поверхность обезжиривают ацетоном, бензином или раствором щелочи и наносят флюс;
- 3) газовой горелкой равномерно прогревают место пайки до температуры, при которой начинает плавиться припой;
- 4) после лужения дефекты запаивают, применяя для этой цели паяльник или газовую горелку.

После пайки изделие тщательно промывают горячей и холодной водой [9].

ПАЙКА МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

Технически чистая медь обладает высокой теплопроводностью и электропроводностью и достаточно высокой коррозионной стойкостью. Она устойчива против атмосферной коррозии вследствие образования на ее поверхности тонкой защитной пленки, состоящей из $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$. Медь — относительно прочный ($\sigma_{\text{в}} =$

$\sigma = 24$ кгс/мм²) и пластичный металл ($\delta = 45 \div 50\%$). С уменьшением содержания в меди газовых примесей пластичность ее возрастает до 62%. При повышенных температурах прочность меди уменьшается, а пластичность возрастает. Ценным свойством меди является ее способность сохранять высокую пластичность вплоть до температуры жидкого гелия 4,2 К (-269°C).

Для повышения прочности и придания меди особых свойств (жаропрочности и коррозионной стойкости и др.) ее легируют различными добавками. Сплавы на основе меди обладают высокими механическими и другими ценными качествами.

Поэтому во многих отраслях техники для изделий, работающих в условиях повышенных и криогенных температур, в качестве основного металла широко применяются медь и ее сплавы, обладающие необходимым комплексом свойств. Пайка этих материалов может производиться всеми известными способами.

Наиболее широкое распространение в промышленности получила пайка паяльником, газовыми горелками, погружением в расплавленный припой и в печах.

Пайка низкотемпературными припоями нашла большое применение благодаря простоте и общедоступности этого способа. Ограничения в ее применении вызваны лишь тем, что паяльником можно осуществлять пайку только тонкостенных деталей при температуре 350°C .

Массивные детали вследствие большой теплопроводности, превышающей в 6 раз теплопроводность железа, паяют газовыми горелками.

Для трубчатых медных теплообменников применяется пайка погружением в расплавы солей и припоев. При пайке погружением в расплавы солей используют, как правило, соляные ванны-печи. Соли обычно служат источником тепла и оказывают флюсующее действие, поэтому дополнительного флюсования при пайке не требуется.

При пайке погружением в ванну с припоем предварительно офлюсованные детали нагревают в расплаве припоя, который при температуре пайки заполняет соединительные зазоры. Зеркало припоя защищают активированным углем или инертным газом.

Недостатком пайки в соляных ваннах является невозможность в ряде случаев удаления остатков солей или флюса.

Широкое распространение в промышленности находит пайка в печах, поскольку при этом обеспечивается равномерный нагрев соединяемых деталей без деформации даже при больших габаритах изделий [3].

При пайке изделий из меди оловянно-свинцовыми и другими легкоплавкими припоями используют обычно канифольно-спиртовые флюсы, водные растворы хлористого цинка или хлористого аммония [9, 11, 21].

Пайка серебряными припоями успешно идет при применении флюсов на основе соединений бора и фтористых соединений калия. Эти флюсы хорошо очищают поверхность меди от окисной пленки и способствуют растеканию припоя.

Недостатком флюсовой пайки меди является трудность получения герметичных соединений. Кроме того, остатки флюса являются очагами коррозии. Поэтому пайку чаще всего осуществляют в восстановительных или нейтральных газовых средах.

Пайку меди в азоте можно осуществлять при температуре $750\text{--}800^\circ\text{C}$.

К недостаткам этого метода можно отнести сложность оборудования по очистке азота, а также отсутствие возможности осуществлять пайку при температуре ниже 750°C .

Имеются сведения о применении пайки меди в среде аргона припоем ЛС 59-1 с дополнительным флюсованием мест пайки водным раствором буры.

Пайку в вакууме успешно применяют для соединений многих металлов, в том числе и меди. Этот вид пайки достаточно экономичен, совершенно безопасен и производится в вакуумных печах или контейнерах, загруженных в обычные печи. Паяные швы, полученные при применении нагрева в вакууме, отличаются чистотой, прочностью металла шва и высокой коррозионной стойкостью.

К недостаткам способа пайки в вакууме следует отнести сложность применяемого оборудования [2, 5].

Соединение меди при низкотемпературной пайке производится стандартными оловянно-свинцовыми припоями ПОССу 30-0,5; ПОС 40; ПОССу 40-0,5, ПОС 61 и свинцово-серебряными припоями ПСр 1,5; ПСр 2,5; ПСр 3 с использованием флюсов на

основе хлористого цинка или канифольно-спиртовых. Соединения, паянные оловянно-свинцовыми припоями, теплостойки до температур 100—120° С.

При снижении температуры до — 196 ÷ — 253° С предел прочности этих соединений увеличивается в 1,5—2,5 раза, достигая 4,5—7,5 кгс/мм²; при этом пластичность резко снижается.

Хрупкость оловянно-свинцовых припоев и паянных ими соединений при низких температурах объясняется аллотропическим превращением олова и образованием в шве хрупких интерметаллидов, которые при низких температурах являются очагами развития трещин [12].

Для оловянно-свинцовых сплавов, содержащих менее 15% олова, падение ударной вязкости не происходит. Это обусловлено тем, что свинец, являясь основой сплава, с понижением температуры увеличивает ударную вязкость, давая во всех случаях вязкий излом. Высокая пластичность свинца делает его нечувствительным к надрезу. Поэтому вполне закономерны стремления применять для пайки изделий криогенной техники припой на основе свинца с содержанием олова менее 15%.

Однако практика их применения показала, что они нетехнологичны, плохо смачивают основной металл и не затекают в соединительные зазоры.

Например, применение припоя на основе свинца, легированного серебром (припой ПСр 3), позволяет получать теплостойкие и хладостойкие соединения из меди. Введение в этот припой 5% Sn (ПСр 2,5) улучшило его технологические свойства, однако при комнатной температуре соединения, паянные припоями ПСр 3 и ПСр 2,5, обладают низкой прочностью. Предел прочности при срезе равен 1,2—1,8 гкс/мм².

Легирование свинца оловом до 16% и кадмием до 5% делает припой ПСр 1,5 более технологичным, однако он становится малопластичным даже при температуре 20° С.

Применение кадмиевых припоев требует специального навыка, так как технологичность их значительно ниже, чем у оловянно-свинцовых. Соединения меди кадмиевыми припоями ПСр 5 КЦН, ПСр 8 КЦН теплостойки до температуры 350° С, но малопрочны ($\sigma_B = 2,9$ кгс/мм²) из-за образования в шве хрупких интерметаллидов и нехладостойки.

Припой на основе цинка редко применяют для пайки меди ввиду интенсивного растворения ее в расплаве припоя. При этом предел прочности на срез не превышает 1,5 кгс/мм².

Цинковые припои, легированные медью и серебром, также плохо растекаются по меди. Легирование этих припоев оловом и кадмием (ПЦА8М, ПЦКд, СрСУ 25-5-5) хотя и несколько улучшает их растекаемость, но швы становятся хрупкими.

Для пайки меди находят также применение припои на основе медно-фосфористой эвтектики с добавлением серебра. Швы, паянные этими припоями, достаточно прочны ($\sigma_B = 25 \div 30$ кгс/мм²), теплостойки до температуры 800° С, но непластичны. В условиях низких температур прочность соединений меди, паянных этими припоями, увеличивается, но пластичность резко падает.

Широкое применение для пайки медных конструкций находят припои ПСр 45, ПСр 40, ПСр 25, ПСр 12.

Пайку этими припоями осуществляют нагревом ацетилено-кислородным пламенем или в печах с использованием коррозионно-активных флюсов № 209, 284. После пайки конструкций остатки флюса необходимо удалять промывкой в горячей воде. Пайку теплообменной аппаратуры осуществляют с применением припоя ПСр 72 или ПСр 71 в вакууме.

При пайке деталей из медных сплавов, конструкция которых позволяет производить пайку под давлением, в качестве припоя можно использовать серебряное покрытие (10—25 мкм) или тонкую серебряную фольгу. При нагреве выше 779° С медь взаимодействует с серебром с образованием в шве сплава типа припоя ПСр 72. Пайка этим (контактно-реактивным) методом осуществляется без применения флюса в вакууме или в инертной среде. Припои на медной основе тугоплавки и вызывают растворение (эрозию) основного металла, поэтому для пайки меди их применяют реже, чем серебряные. Диффузионная пайка меди может быть выполнена галлием, индием, оловом, свинцом, припоями ПОССу 40-2, ПОС 61 путем поджатия деталей в вакууме или аргоне при температурах 650—800° С и длительных выдержках. Припой в месте

пайки можно наносить напылением в вакууме, гальваническим способом или в виде тонкой фольги.

Капиллярную пайку меди низкотемпературными припоями можно производить при зазорах 0,05—0,5 мм и температурах 650—900° С в вакууме или аргоне. При этом соединения меди, паянные индием, галлием, оловом, припоями ПОС 61 и ПОС 40, хрупкие и малопрочные, предел прочности на срез не превышает 4—7 кгс/мм².

При пайке меди свинцом соединения хотя и малопрочны, но пластичны. При применении припоя системы Pb — Ag — Sn — Ni (ПСр 7,5) можно обеспечить предел прочности при растяжении 14 кгс/мм² с достаточно высокой пластичностью, угол изгиба образца, паянного встык, 130° [19].

Пайка латуней. Процесс пайки латуней имеет свои особенности ввиду образования на поверхности окисной пленки, содержащей ZnO и испарения цинка при нагреве.

На латунях, содержащих до 15% Zn, окислы состоят из Cu₂O с внедренными в нее частицами ZnO. В сплавах меди с большим содержанием цинка слой окисла состоит в основном из ZnO, удаление которого более сложно, чем Cu₂O.

Особенность низкотемпературной пайки латуней оловянно-свинцовыми и другими аналогичными припоями заключается в том, что удаление окисной пленки с поверхности латуней не обеспечивается канифольно-спиртовыми флюсами. Для этого необходимо применять более активные флюсы. Например, при пайке латуней ЛС59-1-1, Л63 используют флюсы на основе хлористого цинка с добавками азотной кислоты.

Латунь медленнее, чем медь, растворяется в расплавах оловянно-свинцовых припоев, поэтому при пайке медленнее растут интерметаллидные слои, что должно положительно отражаться на механических свойствах паяных соединений. Однако соединения, полученные при пайке латуни (Л63) оловянно-свинцовыми припоями, имеют более низкую прочность по сравнению с медью в тех же условиях. Например, предел прочности соединений меди встык, паянных оловом, равен 9 кгс/мм², свинцом — 3,6 кгс/мм², а соединений из латуни — 5,9 кгс/мм² и 2,6 кгс/мм² соответственно. Снижение предела прочности соединений латуни связывают с пористостью в швах, которую объясняют испарением цинка и попаданием его паров в жидкий припой. Порообразование наблюдается после пайки как низкотемпературными, так и высокотемпературными припоями.

Высокотемпературную пайку латуни в печах с восстановительной или нейтральной атмосферой применяют ограниченно из-за испарения цинка. Пайка латуней в средах возможна только с предварительным флюсованием мест пайки. Например латунь, содержащую до 3% свинца и кремния ЛКС80-3-2, удовлетворительно паяют в газовых средах медно-фосфористыми и серебряными припоями, но с обязательным использованием флюсов. Латунь паяют в печи без флюса только в том случае, если она предварительно покрыта слоем меди или никеля, предохраняющим от испарения цинка.

Латунные детали можно паять и в соляных ваннах в интервале температур 850—870° С. Для улучшения затекания припоя в зазор в раствор добавляют 4—5% флюса, содержащего фтороборат калия или буру.

При нагреве латунных деталей в пламени газовых горелок и в печах также происходит испарение и окисление цинка, что ухудшает растекание припоев. При пайке латуни горелкой в восстановительном пламени испарение и окисление цинка удается несколько уменьшить. При этом пористость в паяных швах уменьшается.

Для пайки латуней, богатых медью, используют серебряные припои ПСр 72, ПСр 40, ПСр 45, ПСр 25, ПСр 12, а также латуни с низкой температурой плавления (припои типа ПМЦ 36; ПМК 48; ПМЦ54) и медно-фосфористые.

Для латуней, богатых цинком (ЛС59С, Л63, Л68), применяют припой ПСр 40. Фосфористые припои для них непригодны, так как при этом образуются малопластичные паяные соединения. Последнее объясняется тем, что в паяном шве образуются весьма хрупкие фосфиды цинка.

Для соединений, не подвергающихся вибрационным и динамическим нагрузкам, применяют припои ПМЦ 36 и ПМЦ 48.

Латуни интенсивно растворяются при пайке серебряными и медно-фосфористыми припоями. Поэтому паять их следует с высокими скоростями нагрева для сокращения контакта жидкого припоя и твердого металла. Латунь Л63 интенсивно растворяется в припоях ПСр 40, ПСр 45, ПСр 15, меньше в припоях ПСр 37,5 и ПСр 50 КД [9, 11, 21].

Пайка бронз. Оловянистые бронзы можно паять свинцово-оловянными, серебряными и медно-цинковыми припоями. Пайка высокооловянистых бронз медно-цинковыми припоями нежелательна ввиду близости температуры плавления. Пайку оловянных бронз можно производить любым способом: паяльником, газопламенными горелками, контактным нагревом, нагревом т. в. ч., в соляных ваннах, в печах с контролируемой атмосферой; при этом нагрев изделия следует вести постепенно, так как при высоких скоростях нагрева основной металл склонен к краснеломкости.

Пайку можно производить оловянно-свинцовыми припоями с использованием флюсов на основе хлористого цинка с добавками соляной кислоты. При высокотемпературной пайке используют медно-цинковые и серебряные припои с применением флюсов на основе борной кислоты с добавками хлористых и фтористых солей металлов.

Свинцовые бронзы можно паять припоями с флюсами, которые применяют для пайки оловянистых бронз. При этом места пайки необходимо флюсовать более тщательно, поскольку образующиеся на поверхности окислы свинца препятствуют затеканию припоя в зазор.

Алюминиевые бронзы среди медных сплавов выделяются высокими механическими свойствами, в связи с чем их широко используют в машиностроении.

В промышленности применяют как двойные сплавы меди с алюминием (простые бронзы), так и более сложные по составу бронзы с добавками марганца, железа, никеля и других элементов. На поверхности алюминиевой и кремнистой бронзы образуется окисная пленка, которая трудно удаляется с использованием обычных флюсов. Изделие перед пайкой необходимо обрабатывать во фтористо-водородной или плавиковой кислоте.

При пайке оловянно-свинцовыми припоями применяют активные флюсы с повышенным содержанием соляной кислоты. Рекомендуются предварительная очистка и флюсование поверхности алюминиевой бронзы смесью борной кислоты с хлористыми солями металлов. Марганцевые бронзы следует паять с применением ортофосфорной кислоты.

Алюминиевые бронзы во избежание окисления и образования хрупких интерметаллидов в шве следует паять, применяя быстрые методы нагрева. Введение в припой никеля повышает пластичность и прочность соединений из алюминиевой бронзы. Повышение пластичности, вероятно, обусловлено образованием интерметаллида алюминий — никель, что предотвращает образование окислов алюминия.

Для высокотемпературной пайки алюминиевых бронз серебряными и медно-цинковыми припоями флюсы № 200 и 284 непригодны, так как они не растворяют окислы на их поверхности. Для успешной пайки в эти флюсы необходимо ввести кремнефтористый натрий (10—20%) или флюс для пайки алюминия (до 50%).

Высокотемпературную пайку марганцовистых бронз осуществляют с использованием флюсов, в состав которых входят фторобораты и фториды щелочных металлов.

При высокотемпературной пайке бронз ввиду их краснеломкости следует обращать внимание на конструирование фиксирующих приспособлений и добиваться, чтобы они не препятствовали расширению деталей при нагреве и, следовательно, не создавали в них напряжений, могущих вызвать растрескивание в процессе пайки.

Берилловые бронзы паять значительно труднее, чем другие медные сплавы, их следует паять немедленно после механической зачистки серебряными припоями с флюсом, в состав которого должны входить фтористые соли.

Медно-никелевые сплавы паяют любым способом и припоем, в том числе и чистой медью. Пайку медью в печи с контролируемой атмосферой необходимо выполнять при высоких скоростях нагрева, так как при длительной пайке основной металл растворяется в припое и прочность шва значительно падает.

ПАЙКА НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Никель является одним из важнейших промышленных металлов. Чистый никель имеет высокий предел прочности ($\sigma_B = 40 \div 50$ кгс/мм²) и пластичность ($\delta = 50\%$), обладает высокой химической стойкостью.

Сплавы на основе никеля характеризуются высоким электрическим сопротивлением и коррозионной стойкостью, а также повышенной жаропрочностью и жаростойкостью.

На чистом никеле при нагреве образуется только один окисел NiO , при легировании никеля хромом, алюминием, титаном и другими металлами образуется комплекс окислов соответствующих металлов [13].

Электрохимические никелевые сплавы типа монель и константан, представляющие собой сплавы никеля с медью и железом, имеют на своей поверхности химически не стойкую окисную пленку, которая легко восстанавливается в газовых средах, удаляется флюсованием и при высокотемпературной пайке в вакууме разлагается на кислород и металл. Поэтому пайка этих сплавов не вызывает затруднений. При пайке можно применять припой, флюсы и газовые среды, рекомендованные для сталей и меди. Для пайки никелевых сплавов требуется применение специальных флюсов, поскольку поверхность сплавов, например никеля с хромом (нихромы), покрыта весьма стойкой окисной пленкой, содержащей окислы хрома. В случае легирования нихромов алюминием и титаном химическая стойкость окисной пленки возрастает, что влечет за собой ряд затруднений при пайке. Пайка жаропрочных сплавов на основе никеля в восстановительных газовых средах требует тщательной их очистки от остатков кислорода с помощью платинового или дунитового катализатора, а также дополнительного осушения до точки росы (-70°C).

При пайке жаропрочных сплавов на основе никеля в вакууме или нейтральных газовых средах последние необходимо тщательно осушать с помощью цеолита, перекиси бария или фосфорного ангидрида. Перед пайкой нихромы нужно покрывать слоем никеля или меди толщиной 15 мкм, который обеспечивает хорошее смачивание паяемых поверхностей в вакууме и нейтральных средах без применения флюса.

Для низкотемпературной пайки никеля пригодны оловянно-свинцовые припои, содержащие 40—60% Sn и флюсы, рекомендуемые для пайки сталей.

Для конструкций из никелевых сплавов, работающих при температуре 350—500° C, применяют серебряные припои. Например, для пайки сплава ХН78Т и ХН77ТЮР рекомендуются припои:

- 1) 61% Ag; 28,5% Cu; 10,5% Zn (температура плавления 720—746° C);
- 2) 85% Ag; 15% Mn (температура плавления 970—980° C).

Никелевые сплавы типа нихром и монель склонны к охрупчиванию в контакте с жидкими припоями, особенно содержащими серебро, кадмий, цинк. Для предотвращения хрупкого разрушения пайку этих сплавов производят в отожженном состоянии и при отсутствии внутренних и внешних растягивающих напряжений.

Для работы никелевых изделий при более высокой температуре пайку их производят припоями системы Ag — Pd — Mn, Pd — Ni, Pd — Ni — Cr и др.

Никель и его сплавы практически не подвергаются растворению припоями системы Ni — Mn — Cr, Pd — Ni, Ni — Pd — Ag, Pd — Ni — Cr при пайке до температуры 1150—1250° C.

Пайка жаропрочных никелевых сплавов палладиевыми припоями может быть осуществлена в вакууме или в аргоне. Пайку припоями Ni — Mn — Cr обычно осуществляют в атмосфере аргона, в смесях $\text{Ar} + \text{BF}_3$ или $\text{Ar} + \text{HF}$.

Для кислотостойких и жаропрочных паяных соединений применяют припои на никельхромовой основе, легированные марганцем, бором, фосфором или кремнием для снижения температуры плавления. При этом припой, легированный марганцем, дает более пластичные соединения в сравнении с нихромовыми припоями типа кольманой, легированными бором и кремнием.

Предел прочности на срез соединений сплава инконель, паянного припоем Cr-B, 28,8 кгс/мм², припоем Ni — P — 9,1 кгс/мм², припоем Ag — Pd — Mn — 22,2 кгс/мм².

При пайке нихромов жаропрочными припоями с местным нагревом рекомендуется применять флюсы № 200 и 201, а при пайке серебряными припоями — флюсы № 209 и 284.

Серебряные и медные припои для пайки жаропрочных никелевых сплавов применяют редко из-за низкой жаропрочности и коррозионной стойкости. Кроме того, при пайке никеля медью паяемый металл значительно растворяется в при-

пое. Поэтому необходимы строгая дозировка припоя и четкий контроль температуры пайки.

Для пайки высоконикелевых сплавов не следует применять припой, содержащие в своем составе фосфор, алюминий и магний, которые образуют на границе раздела припоя и основного металла хрупкие интерметаллидные фазы.

При пайке никеля и его сплавов необходимо следить за тем, чтобы применяемые газовые среды не содержали соединений серы. При взаимодействии серы с никелем образуется легкоплавкая эвтектика, проникающая по границам зерен и вызывающая охрупчивание металла.

При пайке никелевых сплавов припоями, легированными бериллием и особенно бором, основной металл активно растворяется в припое, поэтому необходимо строго соблюдать режим пайки. Процесс пайки следует вести с высокими скоростями и без перегревов.

Заметному локальному растворению подвергаются никелевые сплавы при пайке их припоями, содержащими кремний, особенно при температуре выше 1200°C , что приводит также к снижению растекания припоя.

Пайка нихрома, сплава инконель, а также никелевых сплавов, содержащих алюминий и титан, требует достаточно активных флюсов. При применении боридных флюсов при печной пайке из-за образования легкоплавкой боридной эвтектики $\text{Ni} - \text{B}$ возможна эрозия основного металла. Поэтому пайку в печах никеля и его сплавов проводят в атмосфере водорода с точкой росы — $40 \div 70^{\circ}\text{C}$. Сплавы, легированные алюминием и титаном, паяют в вакууме, в смесях нейтральных газов с газовыми флюсами BF_3 или NH_4Cl .

ПАЙКА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

Титан по совокупности физико-механических свойств является одним из важнейших современных конструкционных материалов. Он почти в 2 раза легче, чем углеродистые стали и многие цветные сплавы, его плотность равна $4,5 \text{ г/см}^3$. Титан высокопрочный ($\sigma_{\text{в}} = 30 \div 60 \text{ кгс/мм}^2$) и пластичный металл ($\delta = 25 \div 50\%$). Коррозионная стойкость титана в ряде агрессивных сред превосходит нержавеющие стали. Титан довольно широко распространен в природе, его в 10 раз больше, чем Mn , Cr , Cu , Zn , V , Ni , Co , Mn , W и Nb вместе взятых. Эти и ряд других ценных свойств открывают большие возможности широкого применения титана в промышленности [13].

На поверхности титана всегда имеется альфированный слой, насыщенный атмосферными газами. Перед пайкой этот слой необходимо удалить пескоструйной обработкой или травлением в растворе следующего состава: 20—30 мл H_2NO_3 , 30—40 мл HCl на литр воды. Время травления 5—10 мин при комнатной температуре. После такой обработки на поверхности титана все же остается тонкая окисная пленка, препятствующая смачиванию титана припоем. Поэтому иногда пытаются паять титан с применением специальных флюсов, по составу и химизму действия аналогичных флюсам для пайки алюминия. Но соединения титана, паянные с применением таких флюсов, получаются недостаточно качественными. Обычно пайку титана и его сплавов ведут в вакууме или в аргоне марки А, который тщательно очищен от примесей кислорода, азота и паров воды. Только в такой чистой атмосфере или в вакууме окисная и нитридная пленки на титане растворяются в металле при условии, что температура пайки выше 700°C . Поэтому процесс пайки титана ведут обычно при температуре $800\text{—}900^{\circ}\text{C}$, что способствует быстрой очистке поверхности титана и хорошему смачиванию его припоями. Пайку титановых сплавов при более высокой температуре производят довольно редко, особенно печную, так как при длительном нагреве при температуре выше 900°C он склонен к росту зерна и к некоторому снижению пластических свойств. Поскольку предел прочности основного металла при этом практически не снижается, то в отдельных случаях соединение титановых сплавов пайкой производят даже при 1000°C .

Водород, всегда находящийся в титане и снижающий его пластичность, удаляется при пайке (или нагреве) в вакууме 10^{-4} мм рт. ст. при температуре около 900°C , поэтому пайка титана в вакууме предпочтительнее, чем пайка в нейтральной атмосфере.

При выборе припоя, способа и режимов пайки необходимо иметь в виду, что титан образует хрупкие интерметаллиды в паяном шве почти со всеми элементами,

входящими в припой. Поэтому в качестве основы припоя часто выбирают серебро, которое образует с титаном интерметаллиды, предположительно менее хрупкие, чем с другими металлами. Иногда за основу припоев выбирают алюминий, который образует с титаном ограниченную область твердых растворов, что позволяет рассчитывать на получение менее хрупких паяных соединений.

Из указанных припоев практическое применение нашли серебряные припой, которые позволяют получить при пайке в печи при температуре $950\text{--}1000^\circ\text{C}$ высокопрочные паяные соединения. Так, например, при пайке титана ВТ1Д чистым серебром в атмосфере аргона предел прочности (σ_B) паяных соединений составляет $18\text{--}20\text{ кгс/мм}^2$, а при пайке серебром, легированным марганцем (10—15%), предел прочности (σ_B) паяных соединений достигает 28 кгс/мм^2 . При этом соединения, паянные чистым серебром, неустойчивы против коррозии и в течение года (в городской атмосфере) снижают свою прочность на 25—30%.

Еще более высокие значения предела прочности паяных соединений можно получить при высокотемпературной пайке титана припоями на основе никеля или меди ($\sigma_B = 30\text{ кгс/мм}^2$), но эти металлы очень быстро растворяют его, вызывая сильную эрозию и охрупчивание в зоне швов.

Для получения более пластичных и прочных соединений с успехом применяют диффузионную пайку титана, сущность которой заключается в том, что изделие, паянное минимально необходимым количеством припоя, например никелем, медью, железом, кобальтом и другими металлами, выдерживают при температуре пайки до тех пор, пока в паяном соединении не образуется пластичный твердый раствор. Прочность соединений, полученных таким способом, близка к прочности основного металла [18].

Пайка титановых сплавов оловянно-свинцовыми и другими низкотемпературными припоями применяется редко. В этом случае перед пайкой титан покрывают никелем химическим или гальваническим способом. Для увеличения сцепления никеля с титаном его подвергают нагреву до 250°C в течение 1 ч. После этого пайку производят теми же припоями и флюсами, которые применяют для чистого никеля.

Паять титан и его сплавы легкоплавкими припоями возможно также после предварительного покрытия деталей оловом, серебром или медью. Для покрытия оловом подготовленное под пайку изделие быстро опускают на 10—20 мин в нагретое до 700°C олово. Покрывать титан оловом можно и при помощи флюса, в состав которого входит хлористое олово. Компоненты флюса просушивают и применяют в мелкоразмолотом виде. Деталь покрывают флюсом толщиной до 3 мм и нагревают в печи с нейтральной средой до $350\text{--}400^\circ\text{C}$.

Медное покрытие может быть получено погружением изделия на несколько секунд в расплавленную хлористую медь или ее смесь с другими хлоридами меди при температуре $650\text{--}700^\circ\text{C}$.

Серебром титан покрывают методом погружения изделия в расплавленное серебро. После охлаждения деталь очищают от остатков флюса и шлака паром или кипячением в воде с последующей зачисткой наждачной бумагой или щеткой. Луженое изделие паяют легкоплавкими припоями с температурой плавления не более 200°C с применением канифольных флюсов.

Перед нанесением покрытия детали обрабатывают в соответствии с технологией, применяемой в гальванотехнике.

ПАЙКА МОЛИБДЕНА

Удачное сочетание комплекса ценных физико-механических и коррозионных свойств делает этот металл одним из основных конструкционных материалов новой техники.

Молибден имеет температуру плавления 2622°C , и плотность его почти вдвое меньше вольфрама. Из него можно выполнять конструкции, работоспособные до 2000°C . Молибден имеет высокую коррозионную стойкость против атмосферной коррозии. Однако он так же, как и вольфрам, сильно окисляется и без специальных покрытий не может работать при высоких температурах в воздушной атмосфере.

Основное затруднение при пайке молибдена возникает из-за большого сродства его к кислороду, а также склонности к росту зерна при высоких температурах [10, 11].

Температура рекристаллизации молибдена зависит от многих факторов и в первую очередь от степени его деформации и чистоты и колеблется от 850 до 1220° С. При переходе через порог рекристаллизации молибден становится хрупким, что необходимо учитывать при выборе припоя для его пайки. Кроме того, молибден имеет небольшой температурный коэффициент линейного расширения ($\alpha = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), что отличает его от металлов и сплавов, с которыми он обычно соединяется при пайке (медь, никель, железо).

По этим причинам пайку молибдена необходимо производить в глубоком вакууме или в среде аргона, тщательно очищенном от кислорода и паров воды, с применением высокой скорости нагрева. Перед пайкой молибдена должна быть полностью удалена окисная пленка путем погружения в расплав состава 70% NaOH и 30% Na₂CO₃ при температуре не выше 400° С или с помощью электролитического травления в 80%-ном водном растворе серной кислоты при температуре 50—60° С.

В качестве припоев для пайки молибдена пригодно большинство припоев, рекомендованных для пайки вольфрама. Например, припой, содержащий 80% Ni, 14% Cr и 6% Fe, обеспечивает получение паяного соединения с пределом прочности на срез 13,2 кгс/мм² при 980° С.

Если пайку производят при температуре выше температуры рекристаллизации молибдена (около 1100° С,) то время выдержки при пайке должно быть минимальным. Для пайки молибдена со сталью рекомендуется припой на медной основе состава 10% Ni, 10% Mn, 2—3% Cr, 1—2% Fe, 0,5% Si. При пайке со сталью 12X18H9T предел прочности паяного соединения при 600° С составляет 22—23 кгс/мм².

Для пайки молибдена применяют припой системы золото — никель, обеспечивающие получение надежных паяных соединений. В массовом производстве из-за дефицитности золотые припои применяют редко. Для пайки, например, меди с молибденом применяют припой ПСр 72 или чистое серебро. Для улучшения растекаемости серебряных припоев молибден покрывают никелем и медью. Толщина никелевого слоя не должна быть больше 3 мкм, медного 3—4 мкм; при большей толщине возможно отслаивание покрытия. Для улучшения сцепления никелевого покрытия с молибденом производят термообработку в вакууме при температуре 950—1000° С. Кроме того, молибденовые детали перед никелированием отжигают в вакууме при температуре 950—1000° С с выдержкой 10—15 мин.

Растекаемость серебряных припоев ПСр 72 и чистого серебра по молибдену улучшается при введении в них 1—2% Р.

Для пайки молибдена в качестве припоя можно применять чистую медь. Однако медь плохо смачивает и растекается по поверхности молибдена. Для улучшения смачивающей способности медь легируют кобальтом, железом, марганцем, никелем, кремнием, палладием. Количество легирующих добавок в медных припоях регламентируется и не должно превышать 4—5%. Ограничение вызвано тем, что все названные добавки, кроме палладия, образуют с молибденом хрупкие интерметаллиды, которые кристаллизуются на границе раздела и ослабляют прочность соединения. При пайке молибдена чистой медью необходимо строго соблюдать режим пайки: температура 1100° С, выдержка 20 мин. Увеличение температуры и выдержки приводит к увеличению хрупкой диффузионной зоны и к снижению прочности соединения.

Молибден можно паять и чистым никелем. Никель наносят на молибден гальваническим способом или в виде фольги. Пайку производят в вакууме 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст. при температуре 1350° С, т. е. выше температуры образования эвтектики, с поджатием деталей с усилием 1,5 кгс/мм², с выдержкой при температуре пайки 2—6 ч. При таком режиме происходит полное растворение никеля в молибдене с образованием твердого раствора, в швах не образуется хрупких зон, и соединения выдерживают многократные нагревы до 2600° С.

Соединения молибдена, паянные легкоплавкими оловянно-свинцовыми припоями с использованием флюсов на основе водного раствора хлористого цинка, могут работать при температурах не более 150° С.

Для пайки соединений молибдена, работающих при температурах $\leq 650^\circ\text{C}$, применяют припои: Ag + 0,25% Р; Ag — Cu; Ag — Cu — Ni — Li. Пайку производят погружением в расплавленный припой или газовой горелкой.

ПАЙКА НИОБИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Высокая коррозионная стойкость в сильных кислотах и в расплавленных щелочных металлах, стойкость при облучении, сверхпроводимость и другие свойства делают ниобий и его сплавы весьма ценными конструкционными материалами для атомной техники, ракетостроения, химического аппаратостроения и других областей техники. Температура плавления ниобия 2500°C , предел прочности $\sigma_{\text{в}} = 40 \text{ кгс/мм}^2$, относительное удлинение $\delta = 30\%$.

При высокотемпературном отжиге ниобия 1450°C и выше отмечается собирательная рекристаллизация, т. е. интенсивный рост зерна и появление выделений по границам зерен, при этом ударная вязкость ниобия снижается примерно в 20 раз [13].

При нагреве на воздухе с 200°C ниобий заметно окисляется. С повышением температуры окисляемость сильно возрастает. Резкое повышение окисляемости ниобия при 1000°C и выше связано не только с увеличением скорости диффузии кислорода, но и с качественными изменениями, происходящими в структуре окисной пленки. При температуре $1000\text{--}1100^{\circ}\text{C}$ происходит переход низкотемпературной модификации окисла $\alpha - \text{Nb}_2\text{O}_5$ в высокотемпературную модификацию $\beta - \text{Nb}_2\text{O}_5$, сопровождающийся значительным увеличением объема (в 2,7 раза), что приводит к возникновению внутренних напряжений и локальным разрушениям пленки и ее отслоению. Последнее вызывает резкое повышение окисляемости ниобия.

При нагреве ниобия наряду с его окислением происходят диффузия и растворение газов в металле. Предельная растворимость кислорода в ниобии (по массе) составляет: при 500°C 0,25%, при 1916°C 0,72%; азота при 300°C 0,003%, при 1500°C 0,07%. Образование газонасыщенного слоя приводит к резкому повышению твердости и снижению пластичности ниобия. Значительно более высокими свойствами, чем ниобий, обладают сплавы на его основе.

Для получения высокопрочных и пластичных паяных соединений целесообразно для пайки ниобия применять чистые металлы: титан, ванадий, цирконий, которые образуют с ниобием неограниченные твердые растворы.

На основе указанных металлов можно получить пластичные припои и жаропрочные паяные соединения, однако все они слишком тугоплавки и требуют оборудования, позволяющего производить пайку в высоком вакууме при температурах $1600\text{--}1900^{\circ}\text{C}$. Поэтому иногда для пайки ниобия применяют и более легкоплавкие припои, например, припой на основе меди, содержащий 30% Ni, 1—2% Fe, 1—2% Si, 0,2% В и после длительной выдержки при температуре пайки (1500°C) обеспечивающий получение достаточно прочных паяных соединений.

Для пайки ниобия в среде аргона с точкой росы -70°C можно использовать сплавы системы Cr — Pd — Ge. Рекомендовано два сплава:

1) 50% Cr, 30% Pd, 20% Ge, температура пайки 1450°C , выдержка 5 мин. Предел прочности соединения на срез при 1093°C $5,8 \text{ кгс/мм}^2$.

2) 50% Cr, 35% Pd, 15% Ge, температура пайки 1450°C , выдержка 5 мин. Предел прочности соединения на срез при 1093°C $7,4 \text{ кгс/мм}^2$.

Рекомендуется также припой для пайки ниобия, состоящий из 17% Nb, 10% V, 8% Cr, 2,3% Al, Al — Ti — основа. Предел прочности соединения равен 80 кгс/мм^2 , относительное удлинение $\delta = 4\%$.

ПАЙКА ВОЛЬФРАМА

Вольфрам и его сплавы, обладая высокой прочностью, жаропрочностью до температуры 2700°C и другими ценными качествами, являются необходимыми материалами в ряде областей техники. Металлический вольфрам широко применяют в ракетостроении, в электроламповой, радиотехнической и электровакуумной промышленности.

Вольфрам широко используют в промышленности в чистом виде и в виде сплавов, он является наиболее тугоплавким металлом с температурой плавления 3410°C , обладает высоким пределом прочности ($50\text{--}90 \text{ кгс/мм}^2$) и твердостью $HV\text{--}320\text{--}415 \text{ кгс/мм}^2$. Отрицательным качеством вольфрама является его хрупкость при комнатной температуре (относительное удлинение и сужение равны нулю). Механическую обра-

ботку вольфрама можно производить только при температуре 300—500° С, т. е. выше порога хрупкости.

Пайку вольфрама необходимо стремиться производить при температуре ниже температуры рекристаллизации (1450° С), поскольку после рекристаллизации прочность вольфрама значительно снижается. При сварке плавлением рекристаллизация вольфрама и его охрупчивание неизбежны, поэтому применение пайки для изделий из вольфрама предпочтительнее. При соединении вольфрама с другими металлами основная трудность связана со значительным различием в коэффициентах линейного расширения.

При обычной температуре вольфрам обладает высокой химической стойкостью, но при нагревании выше 400—500° С окисляется с образованием триоксида вольфрама WO_3 . При пайке вольфрама требуется особо тщательная очистка поверхности деталей. Очистку производят механическими средствами или травлением в кислотах. Травить можно в смеси равных частей азотной и фтористоводородной кислот с последующей промывкой в горячей воде и спирте. Очистку можно вести также в горячем растворе едкого натра или электролитическим методом, применяя в качестве электролита разбавленный раствор азотнокислого натрия ($NaNO_3$). Способ очистки выбирают в зависимости от степени окисленности вольфрама.

Вольфрам после тщательной очистки успешно паяется во всех защитных и восстановительных средах, но чаще в вакууме, который обеспечивает получение более плотных паяных швов.

Для улучшения смачивания вольфрама расплавленными припоями иногда применяют предварительное гальваническое покрытие его никелем или медью.

Для высокотемпературной пайки вольфрама применяют припои с температурой плавления до 3000° С, в том числе чистые металлы: тантал, ниобий, никель, медь и сплавы $Ni - Ti$, $Ni - Cu$, $Mn - Ni - Co$, $Mo - V$ и др.

Учитывая склонность вольфрама к рекристаллизации, пайку его необходимо производить при максимальных скоростях нагрева с минимальной выдержкой при пайке. Наиболее перспективным способом соединения вольфрама является сочетание пайки с последующей диффузионной обработкой. В результате такой обработки получают паяные соединения с высокой температурой распайки, т. е. вторичного расплавления металла паяного шва.

При диффузионной обработке происходит диффузия, растворение, а также испарение отдельных компонентов. Например, марганец кипит при температуре 2150° С, и при этой температуре он полностью испаряется. Поэтому при диффузионной обработке швов, паянных припоями, содержащими марганец, повышение температуры вторичного расплавления достигается за счет испарения марганца. При правильном сочетании припоя, температуры пайки и времени выдержки можно получить паяные соединения с температурой вторичного расплавления до 2760° С. Например, при пайке вольфрама при температуре 1000—1100° С припоем платина — бор с добавкой порошка вольфрама в результате реактивной диффузии в шве образуется сплав, работоспособный при 2000° С. Преимуществом этого припоя является то, что пайку вольфрама можно производить при температуре ниже температуры его рекристаллизации, т. е. без снижения механических свойств вольфрама.

Перспективным является метод диффузионной пайки, позволяющий до минимума уменьшить толщину прослойки припоя в зазоре, в результате чего сокращается количество жидкой фазы в шве и уменьшается возможность образования хрупких зон.

Для капиллярной пайки вольфрама в вакууме 10^{-4} мм ст. рт. или в аргоне марки А можно использовать стандартные серебряные припои ПСр 72, ПСр 62, ПСр 37,5; медно-никелевые припои ВПр4, ПМ17, ПМ17А и припой на железной основе системы $Fe - Mn$. Наибольший предел прочности $\sigma_b = 26,5$ кгс/мм² при зазоре 0,15 мм обеспечивает припой ПСр 37, 5.

Соединения вольфрама, паянные чистым железом, могут надежно работать при температуре 900° С. Соединения, паянные припоем состава 75% Cr, 25% V успешно работают при температуре 1200° С.

Возможно соединение вольфрама и при использовании в качестве припоев меди, марганца, олова и серебра, обеспечивающих высокую прочность соединений, получающуюся за счет насыщения шва вольфрамом (табл. 2.). Зерна вольфрама диспер-

гируют из-за адсорбционного понижения прочности под действием расплавов припоев и спекаются в капиллярном зазоре [11].

2. Припой для диффузионной пайки вольфрама

Компоненты	Содержание, %	Температура пайки, °С	Компоненты	Содержание, %	Температура пайки, °С
Ni	83,5	1066	Mn	68	1066
Cr	6,5		Ni	16	
Fe	2,5		Co	16	
B	3,0		B	0,5	
Si	5,0		Ni	70	1185
C	0,15		Cr	20	
		Si	10		
		Fe	1		
Примечания: 1. Паяют в атмосфере водорода. Припой применяют в виде порошка. 2. Время пайки 5 мин.					

ПАЙКА ЦИРКОНИЯ

Цирконий является относительно тугоплавким металлом с температурой плавления 1855° С, плотность его равна 6,4 г/см³. Цирконий обладает сравнительно низким пределом прочности при растяжении $\sigma_B = 20 \div 28$ кгс/мм². Прочность его ниже, чем у титана и железа, а твердость примерно одинакова. Добавки к цирконию молибдена, ниобия, титана и других улучшают его механические свойства. Цирконий и его сплавы пластичны, хорошо обрабатываются давлением, резанием, обладают высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах.

Близкие значения температурных коэффициентов объемного расширения циркониевых сплавов и некоторых диэлектриков позволяют использовать их для получения соединений со стеклом и керамикой. Эти свойства делают цирконий и его сплавы весьма ценным материалом в электронике и вакуумной технике.

При комнатной температуре цирконий и его сплавы инертны по отношению к газам, но при повышенной температуре они взаимодействуют с кислородом, азотом и водородом, образуя окислы, нитриды и гидриды. Водород — единственный газ, реакция поглощения которого цирконием обратима. Максимальное насыщение циркония водородом происходит при температуре 280—300° С. При нагреве в вакууме до температуры 800° С водород полностью удаляется.

С азотом цирконий начинает взаимодействовать с температуры 400° С. Наибольшее поглощение азота из воздуха происходит в интервале температур 1000—1600° С. Удалить азот из циркония при нагревании в вакууме до температуры 1300° С не удается [5].

Реакция циркония с кислородом сопровождается образованием на его поверхности окисной пленки. Однако при температуре выше 450° С пленка растворяется в металле, вследствие чего происходит дальнейшее поглощение кислорода. Удалить кислород из циркония нагревом в вакууме не удастся. Инертные газы аргон и гелий не растворяются в цирконии, но при недостаточной их чистоте цирконий окисляется и на его поверхности образуется слой окислов черно-синего цвета. Перед пайкой цирконий и его сплавы травят в смеси водных растворов плавиковой и азотной кислот (3 мл азотной, 5 мл плавиковой кислоты и 92 мл воды).

При пайке циркония в аргоне или гелии их необходимо предварительно очищать от примесей кислорода, водорода, азота и паров воды. Паять цирконий и его сплавы в вакууме можно при разрежении в камере пайки не ниже 10⁻⁵ мм рт. ст.

При выборе припоя необходимо учитывать, что многие компоненты, входящие в припой (Ag, Cu, Ni), активно взаимодействуют с основным металлом с образованием

химических соединений или легкоплавких эвтектик. Поэтому пайку циркония с медью, никелем, железом или нержавеющей сталью можно осуществлять без припоя, контактно-реактивным методом. Хотя соединения получаются и непрочными, но обеспечивают герметичность и коррозионную стойкость.

Многие припои активно растворяют цирконий, вызывая сильную эрозию или сквозное проплавление тонкостенных конструкций. Сильной эрозии цирконий подвергается при пайке медью. Припой на основе титана не вызывает эрозии, так как титан с цирконием образуют твердые растворы.

Припоями на основе титана можно паять цирконий диффузионным методом.

Для высокотемпературной пайки циркония можно применять припои на основе золота. Золото с цирконием реагирует при температуре 1065° С. Небольшое количество легирующих добавок железа, никеля, меди, образующих с золотом твердые растворы, снижает температуру пайки, но не изменяет механические свойства паяных соединений. В качестве легирующих компонентов используют также ванадий и ко-

бальт. Эти элементы снижают температуру пайки и уменьшают растворимость циркония в припое, т. е. образуют с цирконием твердые растворы или эвтектику при температуре, значительно превышающей температуру пайки. Для пайки циркония рекомендуются также припои системы Cu — Pd с различными добавками (табл. 3). Легирование меди палладием и цирконием способствует уменьшению растворения основного металла в припое. Температура плавления припоев находится в пределах 960—1050° С, пайку циркония этими припоями осуществляют в вакууме 10⁻⁴ мм рт. ст.

Припои обеспечивают вакуумную плотность соединений циркония с железом, низкоуглеродистой сталью и никелем при комнатной и повышенных температурах. Пайку циркония этими припоями

3. Припои для пайки циркония (без предварительного покрытия)

Компо- ненты	Содержание, % по массе		
	1	2	3
Pd	19—20	17—20	19—20
Cr	—	—	2,5—3
Zr	3—4	2—3	—
Ti	—	1—1,5	—
Cu	Остальное		

осуществляют без нанесения барьерных покрытий, что упрощает технологический процесс и повышает надежность соединений.

Пайку циркония без барьерного покрытия осуществляют и самофлюсующими серебряными припоями.

Для предотвращения растворения циркония припоями, вступающими с ним в активное взаимодействие, применяют промежуточные барьерные покрытия. В этом случае используют никелевое покрытие, которое имеет удовлетворительное сцепление с цирконием при условии предварительного травления поверхности детали в водных растворах фторида аммония и плавиковой кислоты, подогретых до 30—40° С, и последующего отжига в вакууме при 850—900° С. Пайку по никелевому покрытию можно производить всеми легкоплавкими припоями, смачивающими никель, и высокотемпературными, но с температурой пайки, не превышающей 900° С, так как при температуре 960° С образуется легкоплавкая эвтектика.

Припои на основе серебра, рекомендуемые для пайки никелированного циркония, приведены в табл. 4. При пайке этими припоями по никелевому барьерному покрытию обеспечивается вакуумная плотность и предел прочности паяных соединений до 20 кгс/мм².

Для работы соединений циркония при высокой температуре применяют более тугоплавкие барьерные покрытия, например, ниобий. Пайку по ниобиевому покрытию производят при температуре 1000—1200° С припоями системы Zr — Ni, Zr — Ni — Pd, Ti — Pd и др. (см. табл. 4).

При пайке циркония с ниобием, танталом, молибденом и гафнием, без нанесения барьерного покрытия, применяют припой системы Zr — V, Zr — Co и др. (см. табл. 4). Соединения, паянные этими припоями, обеспечивают теплостойкость до температуры 1200—1300° С.

4. Припой для пайки циркония

Состав, % по массе	Температура плавления, °С	Покрытие
78 Ag; 22 Cu	779	Никель
60 Ag; 39 Cu; 1 Ni	820	
63 Ag; 27 Cu; 10 Ni	710—685	
90 Zr; 10 Ni	1200	Ниобий
60 Pd; 40 Ni	1237	
59 Pd; 25 Ni; 40 Si; 0,5 Be	1160—1115	
53 Ti; 47 Pd	1080	
80 Ag; 20 Pd	1120—1080	
72 Ag; 18 Pd; 10 In	930—980	
92 Zr; 6,6 Ni; 1,4 Be	1000—1200	Без покрытия для пайки с молибденом и ниобием
85 Zr; 15 Co		
70 Zr; 30 V		
70 Ti; 30 Cu		

ПАЙКА ТАНТАЛА

Тантал среди других металлов выделяется исключительной химической стойкостью в сильных кислотах, в расплавах щелочных металлов и рядом других свойств. Он имеет температуру плавления 2996° С и плотность 16,6 г/см³ и в отличие от вольфрама и молибдена обладает пластичностью. Тантал промышленной чистоты в отожженном состоянии при комнатной температуре имеет предел прочности $\sigma_B = 42$ кгс/мм², относительное удлинение $\delta = 25\%$, а при 980° С $\sigma_B = 14$ кгс/мм². Температура пластично-хрупкого перехода тантала лежит ниже — 196° С.

Кроме чистого тантала в промышленности применяют сплавы тантала с вольфрамом, ниобием, молибденом, гафнием. Сплавы тантала достаточно пластичны. Относительное удлинение равно 25 — 30% и зависит от способа выплавки. Тантал и его сплавы используют в электротехнике и для нагревателей в вакуумных печах. Известно также применение чистого тантала и его сплавов с ниобием в химическом аппаратостроении.

При нагреве на воздухе тантал, так же как ниобий, начиная с 200—300° С заметно окисляется. Наряду с окислением происходит диффузия газов в металл, и непосредственно под окисной пленкой образуется газонасыщенный слой, толщина которого зависит от температуры и времени нагрева.

Тантал интенсивно поглощает газы при нагревании, поэтому при пайке тантала предпочтителен вакуум не ниже 10^{-4} мм рт. ст.

В качестве припоев для пайки тантала целесообразно использовать прежде всего такие металлы как титан, ванадий, ниобий и молибден, которые образуют с танталом непрерывный ряд твердых растворов, что позволяет получать высокопрочные и пластичные паяные соединения. Имеются сведения об успешном применении сплавов из указанных металлов, например припой, содержащий 85% Ti и 15% Mo, дает возможность производить пайку при 1850°C .

Для диффузионной пайки сплава тантала с 1% W в качестве припоя применяют чистый титан. Припой в виде фольги укладывают в места соединений. Пайку производят в печи при разрежении 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст., температура пайки 1760°C , выдержка 10 мин. Температура вторичного расплавления шва после пайки поддерживалась 2092°C , предел прочности соединений при 1928°C составлял $1,65\text{ кгс/мм}^2$. Для капиллярной пайки применяют припой на основе тантала с 40% Hf. Пайку выполняют при температуре 2205°C с выдержкой 1 мин. Для пайки тантала запатентован припой следующего состава: 20% Ta, 5% Nb, 3% W. Пайку этим припоем осуществляют в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. при температуре 1000°C с выдержкой 5 мин. Предел прочности соединения на срез $\tau_{\text{ср}} = 20\text{ кгс/мм}^2$, температура вторичной распайки 2000°C .

Тантал можно паять по предварительно нанесенному слою серебра. Серебро в виде пасты наносят на тантал, после сушки и обжига при 600°C в течение 1 ч получают прочное сцепление. Обработанный таким образом тантал можно паять, например, с медью. Предел прочности соединения достигает 5 кгс/мм^2 .

Ввиду того, что тантал трудно поддается пайке, его поверхность перед пайкой рекомендуется покрывать никелем или платиной. Пайку покрытых изделий можно вести с применением флюсов, в среде инертных газов или вакууме.

ПАЙКА БЕРИЛЛИЯ

Бериллий — легкий металл (плотность $1,84\text{ г/см}^3$), но имеет высокий предел прочности (56 кгс/мм^2) и довольно высокую температуру плавления (1283°C). Поэтому бериллий является перспективным конструкционным материалом для атомных реакторов, летательных аппаратов и приборостроения.

Ввиду высокой химической активности поверхность бериллия в атмосферных условиях покрывается окисной пленкой BeO. Перед пайкой бериллия с целью удаления окислов производят травление в растворе следующего состава: 450—500 мл ортофосфорной кислоты, 50—55 г хромового ангидрида и 20—25 мл концентрированной серной кислоты. Подогретый до 50 — 60°C раствор более активно снимает окисную пленку.

Легкоплавкими припоями бериллий паяют с применением специальных флюсов, содержащих фториды и хлориды цинка, аммония или щелочноземельных металлов. Нагрев под пайку осуществляют быстро, поскольку применяемые флюсы быстро теряют свои свойства. Перед пайкой поверхности желательно лудить. Лужение и пайку производят оловянно-свинцовыми припоями, содержащими цинк, индий или серебро. Пайку бериллия можно осуществить цинковыми или кадмиевыми припоями, которые хорошо растекаются по поверхности бериллия и затекают в зазор. Для улучшения смачивания легкоплавкими припоями с использованием флюса ЛК-2 бериллий покрывают гальваническим никелированием.

Высокотемпературную пайку бериллия обычно производят в вакууме 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст. или в тщательно очищенных аргоне или гелии. В качестве припоев применяют эвтектические сплавы алюминия с кремнием или серебра с медью. Пайку производят при температуре 785 — 1060°C , выдержке 5—10 мин.

Бериллий можно паять и по специально подготовленной поверхности, которую лудят магнием при температуре 750°C в аргоне. При этом на поверхности бериллия образуется пленка MgBe. Пайку луженой поверхности производят в аргоне при температуре 750°C алюминием, который в виде фольги закладывают между паяемыми поверхностями.

Пайка бериллия алюминием с длительной выдержкой при температуре пайки (870°C) приводит к упрочнению паяного шва. Предел прочности постепенно повышается с 9 до 19 кгс/мм² при выдержке в течение 96 ч.

Другой способ пайки состоит в предварительном покрытии бериллия медью или серебром. Покрытие производят в цианистых или кислотных растворах, металлизацией или погружением в расплав металла. Перед покрытием изделие травят в 5—10%-ном растворе плавиковой кислоты и без промывки переносят в ванну для покрытия. Пайку по барьерному или луженому слою производят серебряными припоями в аргоне или вакууме.

При пайке бериллия серебряными припоями получают предел прочности паяного шва ~ 10 кгс/мм². При пайке бериллия с другими металлами, например с никелем, монель-металлом или с титаном, при применении серебряных припоев обеспечивается предел прочности соединений 10—15 кгс/мм².

Серебряные припои применяют при пайке соединений, работающих при нормальной температуре. Для улучшения смачивания и растекания припоев в них вводят 0,2—0,5% Li. Для работы при высоких температурах припоями служат сплавы бериллия с серебром, титаном или цирконием.

ПАЙКА АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Алюминий и его сплавы находят широкое применение для изготовления паяных конструкций в авиационной, электротехнической, радиотехнической и ряде других отраслей промышленности.

Особенности пайки алюминиевых сплавов определяются такими факторами, как высокая стойкость окисной пленки, низкая температура солидуса большинства промышленных сплавов, высокая теплоемкость алюминия.

Алюминий, обладая большим сродством к кислороду, образует химически и термодинамически стойкий окисел Al_2O_3 , который находится на его поверхности в виде плотной и прочной пленки.

Состав и структура окисных пленок на поверхности алюминиевых сплавов зависят от состава последних. Так, на поверхности алюминиево-магниевых сплавов присутствует смесь окислов Al_2O_3 и MgO .

При пайке алюминиевых сплавов окислы удаляют флюсами в вакууме с добавлением паров магния, трением, абразивным и ультразвуковым лужением.

Кроме того, разработаны способы пайки путем контактного плавления, а также по защитным и барьерным покрытиям и др.

Для высокотемпературной пайки алюминиевых сплавов в качестве флюсов применяют смеси солей хлоридов щелочных и тяжелых металлов с добавками фторидов металлов. Пайку алюминия с указанными флюсами производят припоями на основе алюминия типа силумин, 34А, П575А, П300, П250 и др. Зазор при флюсовой пайке должен быть не менее 0,1—0,25 мм.

Высокотемпературная флюсовая пайка алюминия и его сплавов может производиться с применением газопламенного, печного, индукционного, контактного нагрева, а также путем погружения в расплавы флюсов.

Для пайки алюминиевых деталей применяют пламя бензовоздушных и газовоздушных горелок. Ацетилено-кислородное пламя непригодно, так как оно снижает активность флюсов.

Для пайки тонкостенных ажурных конструкций из алюминиевых сплавов хорошие результаты обеспечивает печной нагрев. Скорость нагрева под пайку зависит от толщины стенок соединяемых деталей [9].

Температуру печной пайки с применением припоя 34А и флюса 34А поддерживают в пределах $550\text{—}560^{\circ}\text{C}$, при пайке эвтектическим силумином $580\text{—}600^{\circ}\text{C}$.

Применение флюса 34А при печном нагреве опасно ввиду возможности значительного растворения основного металла цинком, выделяющимся из флюса. В случае пайки тонкостенных деталей это может привести к сквозному проплавлению. Лучшие результаты дает применение флюсов, в которых хлористый цинк заменен на хлористое олово, хлористый кадмий или хлористый свинец.

Это приводит к резкому снижению растворения паяемой поверхности металлом, выделяющимся из флюса.

Пайка в солевых ваннах отличается высокой производительностью. В связи со значительной температурой пайки (580—620° С) этим способом паяют сплавы с высокой температурой ликвидуса: АД1, АМц и др. Припой должны быть заранее нанесены в виде покрытия или плакирующего слоя (пайка пластинчатых теплообменников).

В случае пайки в солевых расплавах состав флюсовой ванны не должен содержать активных хлоридов типа $ZnCl_2$ из-за сильного растворения основного металла. Для нормальной работы ванны необходимо тщательное удаление из расплава влаги и солей тяжелых металлов. Для этого солевую ванну протравляют алюминием при температуре около 600° С. Еще более высокой степени очистки удастся достигнуть применением порошка сплава 30% Al и 70% Mg.

При подготовке поверхности деталей из алюминиевых сплавов к пайке рекомендуется после обезжиривания деталей производить травление их в 10—15%-ном растворе едкого натра при температуре 60° С с последующей промывкой в холодной воде и обработкой в 20%-ном растворе азотной кислоты, после чего следует тщательная промывка в проточной горячей и холодной воде и сушка горячим воздухом. Пайку рекомендуется производить не позже чем через 6—8 ч после травления [11].

При пайке погружением в расплав флюса необходим предварительный подогрев изделий до 400—500° С. Сборку изделий под пайку производят с помощью специальных приспособлений, не взаимодействующих с солевыми расплавами. Приспособления изготовляют из нержавеющей стали, инконеля, керамики.

Своеобразной разновидностью флюсовой высокотемпературной пайки алюминия и его сплавов является реактивно-флюсовая. Флюсы-пасты для этой цели, как правило, содержат до 90% активных хлоридов. При использовании таких паст наблюдается заметная эрозия основного металла. Рекомендован способ пайки, лишенный указанных недостатков [11]. В этом случае пайку производят путем погружения в солевую ванну, в состав которой вводят небольшое количество (в сумме до 1%) активных хлоридов типа хлористого цинка, хлористого олова, хлористого кадмия и пр.

В связи с тем, что остатки флюсов чрезвычайно коррозионноактивны, особенно при эксплуатации паяных соединений в электропроводящих средах, необходимо после пайки изделия подвергать тщательной обработке с целью удаления остатков флюсов. Для этого детали сразу же после пайки подвергают тщательной промывке в горячей и холодной проточной воде с последующей обработкой в 5%-ном растворе азотной кислоты или 10%-ном растворе хромового ангидрида.

Однако флюсы могут оказаться внутри паяного шва, и такая обработка не устранит опасности возникновения очагов коррозии. В этом заключается основной недостаток флюсовой пайки алюминиевых сплавов.

Прочностные характеристики паяных соединений при применении наиболее распространенных припоев приведены в табл. 5.

5. Прочность паяных соединений из алюминиевых сплавов

Припой	Режим пайки	Предел прочности, кгс/мм ² , для сплавов		
		АМц	АМг6	Д20
П300А	440 °С, 20 мин	11—12	22	—
П425А		12,0	— 20,8	20,8
34 А	550 °С, 20 мин	8—11	—	28,8
В62	510 °С, 15 мин	12,0	—	23,8

Низкотемпературную пайку алюминия и его сплавов припоями на основе олова можно осуществить с применением флюсов на основе высококипящих органических

соединений типа триэтанолamina с добавками в качестве активных компонентов борфторидов кадмия и цинка. Применение этих флюсов хотя и обеспечивает удаление окиси алюминия при пайке, но в промышленности они не нашли широкого распространения, так как не обеспечивают получения надежных и герметичных соединений. Кроме того, компоненты легкоплавких припоев в паре с алюминием образуют коррозионно нестойкие соединения из-за большой разности нормальных электродных потенциалов. Такие соединения не способны работать в коррозионно-активных средах.

Указанные недостатки и затруднения исчезают при использовании технологических покрытий под пайку. В качестве таких покрытий при низкотемпературной пайке алюминия принято использовать медь, никель, серебро, цинк и т. п. Покрытие может быть нанесено электролитически, химически, термовакuumным напылением и т. д.

Наиболее высокое качество сцепления покрытия с основным металлом и коррозионную стойкость паяных соединений обеспечивает применение никель-фосфорных покрытий, наносимых на поверхность алюминия химическим способом из специальных гипофосфитных растворов [4].

Оптимальная толщина покрытия 17—25 мкм. После нанесения покрытия деталь подвергают термообработке в защитной среде (аргон или вакуум) при температуре 200° С в течение 1 ч, что приводит к повышению прочности сцепления покрытия с поверхностью основного металла.

Пайка по покрытию легко осуществима оловянно-свинцовыми припоями с применением канифольно-спиртовых флюсов или на основе водных растворов хлористого цинка.

Коррозионная стойкость таких соединений намного выше соединений алюминия, выполненных без защитных покрытий.

Соединения из сплава АМц и Д16, выполненные по никель-фосфорному покрытию припоем ПОС 61, обеспечивают предел прочности на срезе 3—5 кгс/мм². После годичных испытаний в 3%-ном растворе поваренной соли прочность соединений снижается лишь на 15—18%.

Коррозионная стойкость соединений по медному покрытию, особенно в коррозионно-активных средах, гораздо ниже, чем по никель-фосфорному покрытию.

Коррозионная стойкость соединений повышается при пайке по цинковым покрытиям и, в частности, по слою сплава $Zn + 5\% Al$, нанесенному на поверхность алюминия методом горячего плакирования. Пайку по цинковому покрытию рекомендуется вести припоем типа ПОСК51 с удалением окисных пленок трением или флюсом на основе эвтектики NaOH и KOH, вводимой в количестве до 20% в глицерин.

Известны бесфлюсовые способы низкотемпературной пайки. Бесфлюсовую пайку алюминия можно осуществить в газовых средах без применения защитных покрытий контактно-реактивным методом. В качестве припоя применяют кремний, медь или серебро, которые наносят на алюминий гальваническим путем, термовакuumным напылением или плакировкой. Высокое качество паяного соединения получают при пайке в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. и толщине покрытия 10—12 мкм.

Пайку алюминия припоями типа силумина осуществляют в специальных газовых средах. В качестве последних используют смеси аргона с парами магния. Такая атмосфера способна при температуре 550—580° С восстанавливать окись алюминия и обеспечивать смачивание паяемой поверхности припоями типа силумин. При пайке алюминиевых сплавов в атмосфере паров магния последний переходит из газовой фазы в расплав. Предел прочности соединений сплава АМг6, выполненных этим способом, составляет 35,2—35,8 кгс/мм², а для сплава АМц 11,5—12,5 кгс/мм². Коррозионная стойкость получаемых соединений намного выше соединений, чем при флюсовой пайке.

Пайку в защитной атмосфере можно осуществить при использовании самофлюсующих припоев (например, 3—15% Si, 0,4—10% Mg, Al — остальное) [18]. Другой припой состава 7,5—13,0% Si, 0,3% Cu, 0,1% Mg, 4,5% P, 0,1—30,0% металлов из группы Ni и Co, 0,2% Zn, 0,5% Mn, Al — остальное. Пайку этими припоями следует производить в среде аргона, гелия или в вакууме.

Бесфлюсовую пайку алюминия припоями типа 34А, силумин ПСр 5АКЦ можно производить по предварительно луженой поверхности припоем П200А. Лужение производят абразивным способом, толщина слоя должна составлять 0,03—0,05 мм

на сторону. Нагрев под пайку рекомендуется производить в печи, в потоке аргона или на воздухе индукционным способом.

Известны способы низкотемпературной пайки без применения флюсов, такие как абразивная пайка или пайка трением. При этом способе пайки окисную пленку с поверхности алюминия можно удалить шабером, металлическими щетками, частицами абразива (асбест, металлические порошки, первичные кристаллы сплавов-припоев, в твердо-жидком состоянии и т. п.), находящимися в расплаве припоя. Применяют также абразивные паяльники для лужения алюминия, у которых рабочая часть паяльника представляет собой стержень из частиц припоя и абразива (см. гл. 5).

Собственно операция пайки осуществляется уже после абразивного лужения путем обеспечения плотного контакта по луженым поверхностям при температуре полного расплавления припоя. Возможна подпитка шва припоем.

Ультразвуковое лужение можно производить с помощью ультразвуковых паяльников и в ультразвуковых ваннах.

В связи с тем, что при ультразвуковом лужении отмечается сильная эрозия основного металла, лужению этим способом нельзя подвергать детали с толщиной стенок менее 0,5 мм. Имеется также способ абразивно-кавитационного лужения. При этом способе лужения твердые частицы, находящиеся в жидком припое, в ультразвуковом поле оказывают дополнительное абразивное воздействие на металл.

При пайке алюминия припоями-пастами на основе галлия в качестве наполнителя паст служат алюминий и сплав алюминия с магнием. Температура пайки 200—225° С, время выдержки 4—6 ч. Предел прочности соединений составляет 3—5 кгс/мм².

При пайке по полуде чистым галлием с последующей термообработкой предел прочности соединения составляет 2,8—3,8 кгс/мм². Паяные швы выдерживают ударные, вибрационные и термоциклические нагрузки, обеспечивают вакуумную плотность не ниже 10⁻² мм рт. ст. и имеют удовлетворительную коррозионную стойкость.

Применяют также пайку цинковыми припоями по серебряному покрытию, нанесенному на поверхность алюминия предпочтительно термовакуумным напылением с последующей термообработкой.

Разработан ряд технологических процессов, обеспечивающих надежное соединение алюминия с медью и ее сплавами, со сталью, никелевыми и другими сплавами.

Основные трудности при осуществлении процесса пайки алюминия с указанными материалами заключаются в трудности выбора флюса или газовой среды, обеспечивающих удаление окислов с поверхностей столь разнородных материалов; в образовании хрупких соединений из-за возникновения интерметаллидов в зоне шва; в наличии большой разницы температурных коэффициентов линейного расширения алюминия и перечисленных выше материалов.

Первые два осложнения успешно преодолевают при предварительном нанесении на поверхности соединяемых материалов защитных металлических покрытий.

Пайку алюминия с медью можно успешно осуществить по никелевому покрытию, нанесенному на алюминий химическим способом. Пайку производят в водороде припоем состава 49% Ag, 20% Cu, 31% In; температура пайки близка к температуре плавления алюминия [4].

Пайка алюминия с медью и ее сплавами может также быть осуществлена путем нанесения защитных покрытий типа цинк, серебро и их сплавы на поверхность меди. При этом используют припои на основе олова, кадмия, цинка.

Через серебряное покрытие на меди может быть осуществлена контактно-реактивная пайка с образованием в паяном шве хрупкой эвтектики Al — Ag — Cu. Такие паяные соединения могут быть использованы только в несидовых конструкциях.

Соединение алюминия со сталью, в том числе и с нержавеющей, облегчается при предварительном лужении поверхности стальной детали легкоплавкими свинцово-оловянистыми припоями, алюминием и алюминиевыми припоями с применением активных флюсов на основе хлористых и фтористых солей.

При пайке алюминия со сталью очень важно строго ограничивать режим из-за опасности образования хрупких интерметаллидов в паяных швах. Время выдержки не должно превышать 1—4 мин, температура пайки также не должна превышать заданного предела.

Пайка алюминия с титаном возможна только по слою алюминия или олова, нанесенных на поверхность титана путем горячего лужения.

ПАЙКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Магний является самым легким (плотность 1,8—1,4 г/см³) и дешевым конструкционным материалом. Низкая плотность сочетается с высоким пределом прочности (26—46 кгс/мм²), жаропрочностью и жаростойкостью (до 450—500° С). Высокая прочность и устойчивость при динамических нагрузках позволяют широко использовать эти сплавы в различных конструкциях.

Пайка магниевых сплавов затруднена тем, что из всех конструкционных металлов магний обладает наибольшей активностью. Он известен как геттер. При окислении на поверхности магния образуется пленка сложного состава, содержащая окись магния, гидроокись магния, углекислые, сернокислые и другие соединения. На поверхности сплавов магния окисная пленка имеет более сложный состав за счет окисления легирующих компонентов сплава. Эта химически устойчивая пленка не удаляется в известных активных газовых средах и в вакууме до 10⁻⁵—10⁻⁶ мм рт. ст. [5]. Осуществление процесса пайки затруднено еще и тем, что гидрат окиси магния при нагреве выше 300—400° С разлагается с выделением воды и водорода [10].

Плотность сплавов магния меньше плотности солевых систем, используемых в качестве флюса, поэтому в шве при флюсовой пайке неизбежно присутствуют остатки солей.

Магний имеет наиболее электроотрицательный потенциал (—2,38 В), что затрудняет нанесение надежных покрытий электрохимическим и химическим методами, отличается низкой коррозионной стойкостью.

Сплавы на основе магния являются активным эмиттером, что создает трудности при нанесении покрытий в тлеющем разряде ионным способом [17].

Пайку изделий из магниевых сплавов осуществляют паяльником, газопламенными горелками, нагревом т. в. ч., погружением в ванну с расплавленным флюсом, в печи с контролируемой средой или в вакууме. При использовании газопламенного нагрева подогрев изделий должен осуществляться бензо-воздушной горелкой или пламенем, образуемым при сгорании газов — заменителей ацетилена в смеси с воздухом. Не допускается применение ацетилено-кислородного пламени.

При сборке деталей под пайку надо тщательно удалять стружку, пыль и заусенцы, которые могут явиться источником воспламенения.

Консервирующие смазки, маркировочную краску и т. д. удаляют промывкой в бензине, ацетоне или спирте. Кроме того, консервирующую смазку можно удалить кипячением в 0,5—1% -ном водном растворе соды в течение 20—30 мин с последующей промывкой в теплой воде и сушкой при температуре 60—80° С.

Поверхности деталей в местах пайки должны быть тщательно зачищены от загрязнений и окислов. Зачистку производят напильником, стальной щеткой или шабером.

Окисную пленку удаляют обработкой в водном растворе хромового ангидрида с концентрацией 20—30 г/л при температуре 60—70° С или 150—260 г/л при температуре не выше 30° С с последующей промывкой в горячей и холодной воде.

Подготовленные таким образом детали собирают в приспособлениях.

Перерыв между подготовкой деталей и пайкой не должен превышать 5 ч.

Зазор при флюсовой пайке магниевых сплавов должен находиться в пределах 0,1—0,3 мм.

В настоящее время разработано несколько способов пайки магниевых сплавов, которые можно осуществлять с флюсами и без флюсов [15, 16].

Флюсовую пайку магниевых сплавов выполняют при температуре 450—600° С с использованием припоев на основе магния (табл. 6) и флюсов на основе галлоидов щелочных и щелочноземельных металлов (табл. 7).

Флюс для пайки должен быть хорошо просушен, так как при наличии влаги в нем вследствие образования на поверхности гидроокислов магния пайка оказывается практически невыполнимой.

Нагрев под пайку рекомендуется вести снизу с тем, чтобы пламя не соприкасалось с поверхностью, по которой должен растекаться припой.

Флюс при наличии сравнительно большой нахлестки следует подавать не только к месту подвода припоя, но и с противоположной стороны. Только после расплавления флюса и затекания его в зазор следует начинать вводить припой, который в основном плавится за счет тепла спаиваемых деталей.

6. Припой для пайки магниевых сплавов

Марка	Содержание компонентов, % по массе						Температура плавления, °С
	Cd	Al	Ni	Zn	Mn	Mg	
1	—	26	—	1,3	0,2	72,5	435—520
2	25	21	—	0,3	0,2	53,5	398—415
П430Mг	—	0,8	—	14	—	85,2	430—600
12	11	12	4	—	—	73	560—580

7. Флюсы для пайки магниевых сплавов

Флюс	Содержание компонентов, % по массе										Температура	
	KCl	LiCl	ZnCl ₂	CdCl ₂	ZnF ₂	NaCl	NaF	Крио-лит	Кар-наллит плав-ленный	ZnO	плав-ления	актив-ного действия
5	—	—	—	—	—	—	—	8	89	3	420	425—620
6	42,5	37	—	—	—	10	10	0,5	—	—	400	425—600
134	35	30	10	15	10	—	—	—	—	—	390	420—600

Широкое распространение получил метод пайки магниевых сплавов погружением в расплавленный флюс. Собранные в приспособления узлы нагревают в печи до 400—450° С, а затем на 1—3 мин погружают в ванну с расплавленным флюсом.

Пайку в печи выполняют с флюсом, который наносят на изделие в виде сухого порошка, при этом следует применять электрический или газовый обогрев с автоматическим регулированием температуры.

Эффективен нагрев электрическими нагревательными плитами. В них легко поддерживать необходимую температуру, что очень важно при пайке магниевых сплавов.

Спаянный узел охлаждают до 200° С, промывают в 2—3%-ном кипящем растворе углекислой соды в течение 30—60 мин, а затем в холодной воде, после чего дополнительно обрабатывают при 20—30° С в хромовокислой ванне (табл. 8), промывают в холодной и горячей воде и высушивают в сушильном шкафу при температуре 60—70° С.

Низкотемпературную пайку магниевых сплавов возможно осуществлять только по предварительно нанесенным покрытиям легкопаяемых металлов, например, меди, никеля или серебра.

Электроосаждение олова и никеля осуществляют обычными методами из стандартных электролитов. Гальванические покрытия следует наносить после тщательной подготовки поверхности и декапирования (табл. 9).

8. Состав ванны для обработки изделий из магниевого сплава после пайки

Компоненты	Содержание, г/л	Способ применения
Хромовый ангидрид	150	Погружение в ванну на 1—3 мин
Азотная кислота	240	

9. Состав ванны и режим декапирования изделий из магниевого сплава перед покрытием

Компоненты	Содержание, г/л	Температура, °С	Продолжительность обработки, мин
Ортофосфорная кислота	400—420	13—25	2
Фтористый калий	90—110		

Покрытие медью осуществляют после контактного осаждения цинка (табл. 10) в электролите, состав которого и режим осаждения приведены в табл. 11.

10. Состав и режим работы ванн для контактного осаждения цинка на магний и его сплавы

Компоненты	Содержание, г/л	Температура, °С	Продолжи- тельность, мин	Кислотность раствора, рН
Цинковый купорос Пирофосфорнокислый натрий Углекислый натрий Калий фтористый	40—50 200—220 4—6	40—90	5—7	10,2—10,4
Примечание. Температура и продолжительность обработки зависят от тол- щины цинкового покрытия.				

11. Состав и режим работы ванны для осаждения меди

Компоненты	Содержа- ние, г/л	Темпе- ратура, °С	Продолжи- тельность, мин	Плотность тока, А/дм²
Медь цианистая Натрий цианистый (общий) Углекислый натрий Сегнетова соль Едкий натр Натрий цианистый (свободный)	40—42 50—52 29—31 44—46 7—8 5—6	65—70	0,5—1 *	3,5—4
* При продолжительности 1,3 мин плотность тока 1,2 А/дм².				

Нанесение покрытий на магниевые сплавы гальваническим путем, как показы-
вает практика, сопряжено со значительными трудностями.

Надежное покрытие магниевых сплавов практически любым металлом обеспе-
чивает ионный способ нанесения в тлеющем разряде.

Покрытые детали паяют методами и припоями, применяемыми для пайки металла
покрытия.

При зачистке паяного шва, выполненного с использованием флюса, не следует
стремиться удалять с него литейную корку, так как она защищает металл от корро-
зии. Однако, если ее не удастся сохранить, то надо следить за тем, чтобы из открыв-
шихся под ней пор или раковин были тщательно удалены остатки флюса.

В качестве газовых сред для пайки сплавов на основе магния возможно исполь-
зовать аргон марки А, азот с точкой росы —50° С, вакуум 10⁻³—10⁻⁴ мм рт. ст. и
активную газовую среду, состоящую из аргона или азота, активированного парами
хлористого аммония (0,1% по объему). Применение активной среды позволяет паять
предварительно покрытые медью, никелем или серебром магниевые сплавы при тем-
пературе 150—550° С.

Разработано три способа пайки в этих средах.

1. Пайка магниевых сплавов по покрытию меди, никеля или серебра в аргоне,
активированном парами хлористого аммония.

В качестве припоев используют сплавы с температурой плавления 200—300° С
(например, оловянно-свинцовые). Нагрев и охлаждение производят в атмосфере ар-
гона, содержащего пары хлористого аммония. Использование среды обеспечивает
затекание припоя в зазор, качественное удаление окислов. Обработка поверхности
после пайки не требуется. Предел прочности соединений 4—5 кгс/мм².

2. Пайка с использованием припоев-паст на основе галлия. Процесс пайки можно
осуществлять в среде аргона и азота.

Припой-пасты состава, приведенного в табл. 12, легко наносятся при комнатной температуре. Обе паяемые плоскости с нанесенным припоем приводят в контакт, который надо сохранить в процессе пайки.

Соединения, полученные этим методом, обладают достаточной герметичностью, предел прочности соединений внахлестку до 5 кгс/мм². Отмечается нестабильность механических характеристик. Содержа

12. Припой-пасты на основе галлия для пайки магниевых сплавов

Марка	Содержание компонен- тов, % по массе						Температура плавления основы пасты, °С
	Mg	Cd	Zr	Sn	In	Ga	
1	4	4	4	—	—	88	29,8
2	4	4	1	11	25	55	10,6

жание галлия в составе паст создает возможность получать температуру распайки значительно более высокую, чем температура пайки. Особенность этого метода пайки заключается также в возможности получения паяных соединений в широком интервале температур от 150 до 600° С, что расширяет диапазон применения пайки.

3. Контактно-реактивная пайка магниевых сплавов. Соединение дета

лей этим методом осуществляют с применением промежуточных прокладок металлов-припоев, образующих с магнием эвтектики. В качестве припоев целесообразно использовать медь или никель (толщиной ~ 20 мкм). Процесс осуществляется в нейтральной среде, азоте или вакууме при обеспечении постоянного поджатия в процессе пайки. Температура пайки 450—600° С.

Предел прочности соединений внахлестку не превышает 3—5 кгс/мм².

Разновидностью этого метода пайки является контактнo-реактивная пайка сопротивлением с удалением жидкой фазы. Этим методом соединяют детали встык. Продолжительность нагрева составляет доли секунды (например, для детали Ø 10 мм время нагрева при пайке 0,45 с).

Этот метод пайки обеспечивает получение высокопрочных соединений, сохранение чистоты поверхности соединяемых деталей и в значительной степени свойств основного металла.

Характер коррозионного разрушения паяных соединений магниевых сплавов отличается от коррозионного разрушения других материалов. Шов является катодным участком из-за низкого электродного потенциала магния, в результате чего разрушению подвергается основной материал. Это способствует сохранению прочности паяного соединения.

Для предотвращения и уменьшения коррозии после пайки детали анодируют (под окраску) в электролите, состав которого приведен в табл. 13.

13. Состав и режим работы ванны для анодирования магниевых сплавов

Компоненты	Содержание, г/л	Температура, °С	Продолжи- тельность об- работки, мин	Плотность тока, А/дм ²
Кислый фтористый аммоний	250—300	70—80	30—40	5—6
Двуххромовокислый натрий . .	60—80			
Ортофосфорная кислота . . .	60— 70			

Равномерную, устойчивую к истиранию и поддающуюся полированию поверхность пленку, которая (после дополнительного воскования) обладает высокой коррозионной стойкостью в средах с большой относительной влажностью, дает обработка магниевых изделий (после пайки) в ванне следующего состава (% по массе):

Азотная кислота	0,5—3,0	Трехокись хрома	2—20
Плавиковая кислота	0,2—3,0	Ортофосфорная кислота	0,5—5,0

Ванна работает при низких температурах, время обработки 2—10 мин.

В атмосферных условиях эти меры защиты обеспечивают достаточную устойчивость магниевых сплавов против коррозионного разрушения,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асиновская Г. А. Газопламенная пайка металлов. М., Машгиз, 1955, с. 12—14.
2. Балицкий А. В. Технология изготовления вакуумной аппаратуры. М., «Энергия», 1967, 165 с.
3. Брукер Х. Р., Битсон Е. В. Пайка в промышленности. М., Оборонгиз, 1957, 294 с.
4. Вишенков С. А., Гостенина В. М. Пайка алюминия и его сплавов низкотемпературными припоями по никельфосфорному покрытию. — «Металловедение и термическая обработка», 1958, № 7, с. 21—23.
5. Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. И. Пайка электровакуумных приборов. М., «Энергия», 1967, 287 с.
6. Губин А. И. Пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов. М., «Машиностроение», 1964, 127 с.
7. Есенберлин Р. Е. Пайка металлов в печах с газовой средой. Л., Машгиз, 1962, 127 с.
8. Иншенник К. П., Бухман Н. А. Технология пайки твердосплавного инструмента. М., Машгиз, 1954, 160 с.
9. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. М., «Машиностроение», 1967, 366 с.
10. Лашко С. В., Лашко А. Ф. Пайка легких металлов (магния, титана, бериллия) и их сплавов. М., МДНТП, 1958, с. 36—40.
11. Лоцманов С. Н., Петрунин И. Е. Пайка металлов. М., «Машиностроение», 1966, 250 с.
12. Медведев А. С. К вопросу о свойствах олова и оловянно-свинцовых припоев при низких температурах. — «Цветные металлы», 1954, № 2, с. 52—56.
13. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1970, с. 208—213, с. 257—262.
14. Манко Г. Пайка и припой. М., Машгиз, 1968, 422 с.
15. Маркова И. Ю., Петрунин И. Е. Перспективные способы пайки магниевых сплавов. Семинар по пайке «Новые материалы и технология пайки в машиностроении». М., ЦПНТОМП, 1971, с. 185—189.
16. Алексеев А. С., Маркова И. Ю., Петрунин И. Е. О диффузионной пайке магниевых сплавов. — В кн.: Пайка материалов в машиностроении. Рига, Латвийский республиканский ИНТИ и П, 1968, с. 67—72.
17. Рейнор Г. В. Металловедение магния и его сплавов. М., «Металлургия», 1964, 486 с.
18. Суслов А. А., Куфайкин А. Я. Пайка в промышленности. Сборник I. М., МДНТП, 1970, с. 87—94, 95—103.
19. Шеин Ю. Ф., Петрунин И. Е., Соколова А. В. Применение низкотемпературной пайки. — В кн.: Пайка материалов в машиностроении. Рига, Латвийский республиканский ИНТИ и П, 1968, с. 72—77.
20. Шиняев А. Я., Бондарев В. В. Исследование диффузионных процессов при пайке титановых сплавов. Труды института металлургии им. Байкова, вып. XII. Изд-во АН СССР. М., 1963.
21. Хрянин В. Е., Лакедемонский А. В. Справочник паяльщика. М., «Машиностроение», 1974, 327 с.

Глава 8

ПАЙКА МЕТАЛЛА С КЕРАМИКОЙ

Существует несколько способов получения паяных соединений керамики с металлами: пайка припоями предварительно металлизированной керамики (осуществляется аналогично пайке металлов), активная пайка, пайка стеклоприпоем (глазурью), пайка по сырому металлизационному слою и пайка неметаллизированной керамики под давлением [5, 3] *. Каждым из указанных способов можно пользоваться для получения любых металлокерамических соединений, однако их применимость уменьшается в порядке перечисления. В некоторых случаях возможно более широкое использование менее распространенных способов, что определяется в значительной степени требованиями к соединению, наличием оборудования и соот-

1. Тип металлокерамических соединений и способы их получения

Способ получения соединения	Типы соединений	Примечания
Многоступенчатый (пайка металлизированной керамики)	Торцовые, цилиндрические охватывающие, конусные и цилиндрические внутренние	При пайке высокотемпературными припоями ($T_{пл} \geq 780^{\circ}\text{C}$) выдержки и завышения температуры минимальные
Одноступенчатый (активная пайка) с применением: активного металла в качестве манжет активного припоя порошков активных металлов и их гидридов	Торцовые, цилиндрические, охватывающие и конусные Торцовые Торцовые и конусные	Для снятия внутренних напряжений соединение необходимо медленно охлаждать
Пайка стеклоприпоем	Цилиндрические внутренние, конусные	На керамических деталях необходимо делать фаски. Температурные коэффициенты линейного расширения металлов, используемых для внутренних соединений и керамики должны быть близкими
Пайка по сырому (не выжженному) металлизационному покрытию	Торцовые, конусные	Следует паять медным и медно-золотым припоями в водородной среде и при влажности по точке росы от -10 до $+5^{\circ}\text{C}$
Пайка неметаллизированной керамики под давлением (диффузионная пайка)	Торцовые	Следует паять медным и медно-золотыми припоями под давлением $0,3\text{--}0,5\text{ кгс/мм}^2$ и при выдержке $5\text{--}10$ мин

* Кроме указанных способов существует диффузионная и электронно-лучевая сварка [5, 8, 19].

ветствующими производственными навыками. В табл. 1 даны рекомендации по выбору типа соединения в зависимости от способов получения металлокерамических соединений. Простейшие формы соединений металла с керамикой показаны на рис. 1.

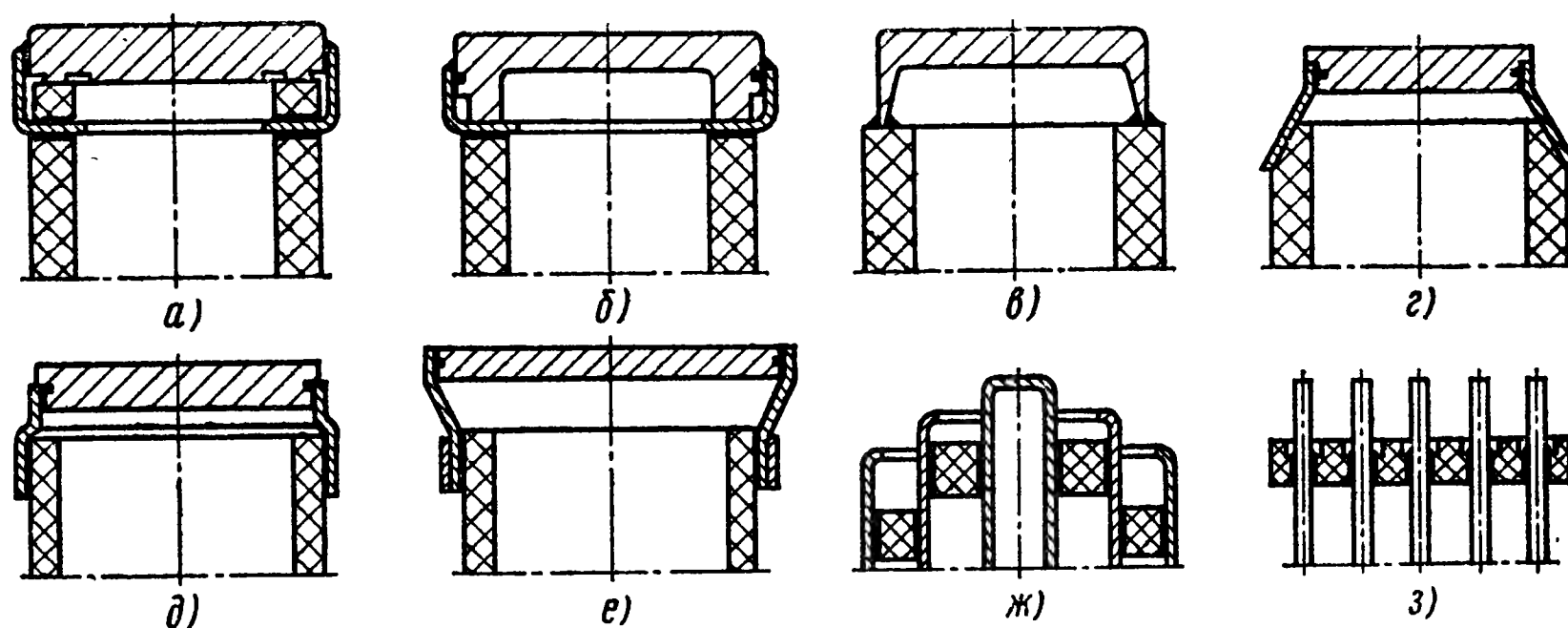


Рис. 1. Элементарные формы соединений керамики с металлами:

а — торцовое компенсированное; *б* — торцовое некомпенсированное; *в* — лезвенное; *г* — конусное; *д* — охватывающее; *е* — охватывающее с бандажом; *ж* — цилиндрическое внутреннее и наружное (охватывающее); *з* — внутреннее

ПАЙКА МЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ

Этот способ получения металлокерамических соединений часто называют **многоступенчатым**. Он заключается в нанесении и закреплении тонкого слоя металла на керамическую деталь (металлизация детали) и в последующей пайке металлизированной детали с металлом.

Закрепление порошков тугоплавких металлов в смеси с активизирующими добавками производится в восстановительной среде при 1100—1650° С и точке росы 10—35° С, при этом сила адгезии металлизационного слоя с окислами керамики определяется двумя процессами: химическим взаимодействием фаз и миграцией стеклофазы керамики в металлизационный слой.

В общем случае в состав металлизационного покрытия, наносимого на керамику, входят порошок молибдена (вольфрама) в количестве 75—95% (по массе) и активные добавки марганца, кремния, титана (гидрида титана), железа, бориды молибдена, ферросилиция, стекла и др. Выбор добавок зависит от химического и фазового составов керамического материала, а также температуры спекания покрытия.

Металлизационные пасты спекаются в водородной среде, содержащей небольшое количество паров воды (точка росы +10 — +30° С); при этом происходят обратимые окислительно-восстановительные реакции с частичным или полным окислением входящих в пасту металлов.

Образовавшиеся в процессе высокотемпературной обработки окислы металлов в последующей стадии взаимодействуют с окислами керамики, что приводит к закреплению спеченного молибденового слоя на поверхности керамической детали. Однако в большинстве случаев параллельно с химическим взаимодействием окислов металлов и керамики протекает диффузионный процесс миграции размягченной стеклофазы, которая скрепляет частички тугоплавкого порошка между собой и прочно соединяет весь слой с керамической деталью.

Таким образом, при выборе технологии металлизации целесообразно руководствоваться следующими положениями:

1. Металлизация наиболее распространенных керамических материалов, имеющих в составе от 5 до 20% (по массе) стеклофазы, протекает при химическом взаимодействии окислов металлов и керамики и одновременной миграции стеклофазы. При этом выбор активных добавок должен определяться их химическим взаимодействием с окислами керамики, а реакции должны происходить при температуре миграции стеклофазы.

2. Металлизация поликристаллических материалов, не содержащих стеклофазы, протекает либо при химическом взаимодействии окислов металлов и керамики, либо при видоизмененном процессе миграции стеклофазы. Соединения, полученные первым способом, как правило, менее стабильны, так как в этом случае требуется строго поддерживать температурно-газовый режим, соответствующий максимальному выходу продуктов реакции между активной добавкой и окислами керамики. Этот способ используют редко, лишь в том случае, когда другими путями не удастся достигнуть соответствующих параметров соединения, например, для узлов, эксплуатируемых при высоких температурах в парах щелочноземельных металлов.

Более широко используют процессы, основанные на применении металлизационных покрытий с добавками стекла и стеклообразующих компонентов, что позволяет получать надежные металло-керамические соединения, выдерживающие температуры до 750—800° С.

Типовая схема получения металлокерамических узлов по многоступенчатой технологии приведена на рис. 2. Операции, отмеченные

2. Состав паст, используемых для металлизации керамических материалов

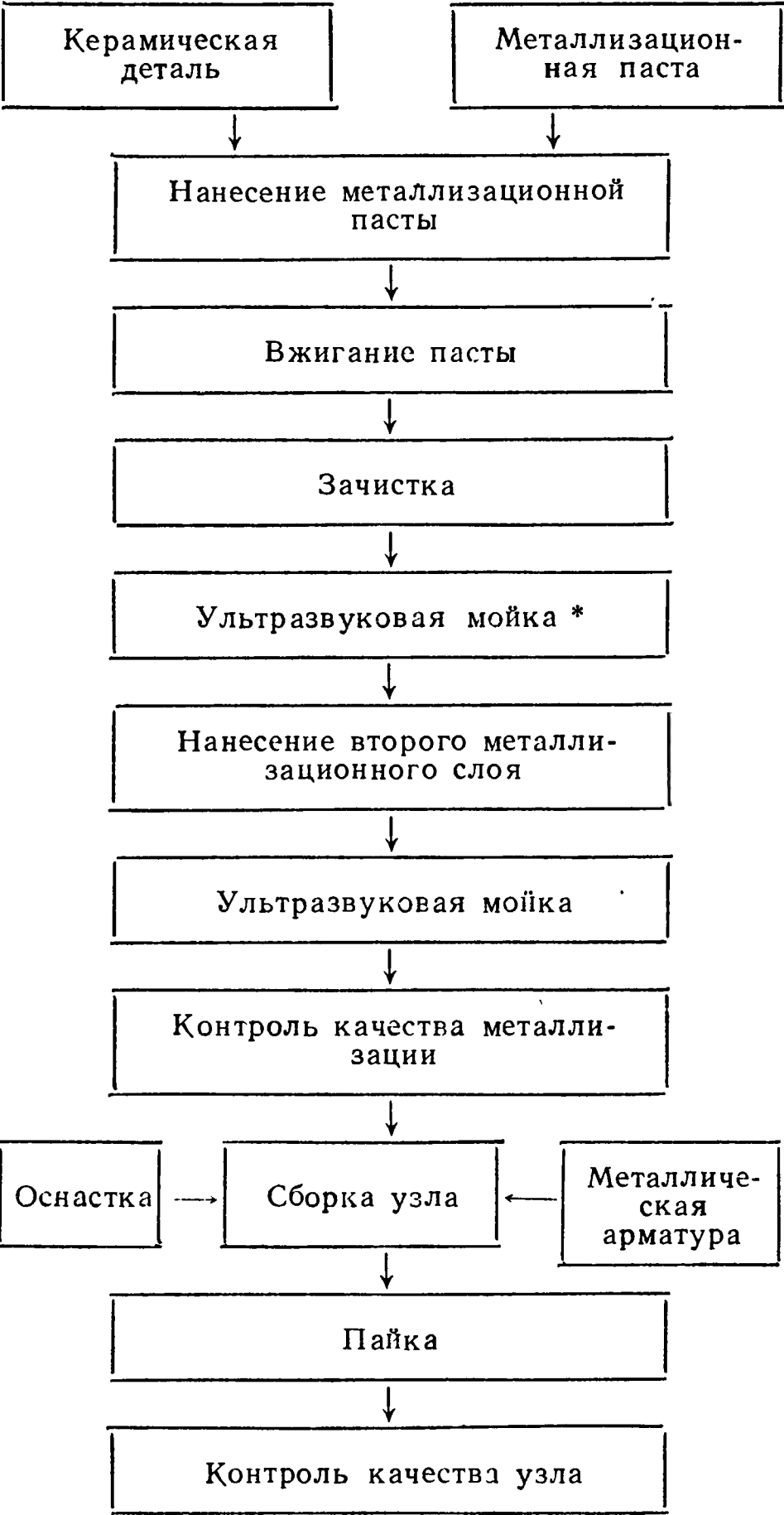


Рис. 2. Процесс получения металлокерамических узлов по многоступенчатой технологии

Марка керамики	Химический состав пасты, % (по массе)
22-хс	Мо 80; Мп 20 Мо 80; Мп 10; TiH ₄ 10 Мо 75; Мп 20; Si 5 Мо 75; Мп 20; Мо ₂ В ₆ 5
М-7	Мо 75; Мп 20, стекло (С48-2) 5 Мо 80; Мп 10; TiH ₄ 10 Мо 75; Мп 20; Si 5 Мо 80; Мп 14; ферросилиций 6
Сапфирит	Мо 75; Мп 20; V ₂ O ₅ 5 Мо 80; стекло (МпО—Al ₂ O ₃ —SiO ₂) 20
Стоал	Мо 75; Мп 20; стекло (С48-2) 5 Мо 80; Мп 14; ферросилиций 6
А-995 Поликор, ГМ	Мо 70; Мп 20; МоВ ₄ 10 W 95; Y ₂ O ₅ 5

звездочкой, при пайке медным припоем иногда отсутствуют. Основными технологическими процессами являются: приготовление и нанесение металлизационной пасты, ее закрепление (вжигание) на деталях, нанесение второго металлизационного слоя и пайка узлов.

Используемые в промышленности составы металлизационных паст для отечественных алюмооксидных материалов приведены в табл. 2.

Все компоненты металлизационных паст перед употреблением тщательно измельчают либо в ацетоне, либо в этиловом спирте. Степень измельчения контроли-

руют по удельной поверхности прибором ПСХ-2. Удельная поверхность молибдена колеблется от 3500 до 7000 см²/г, активных добавок от 6000 до 11 000 см²/г.

Для приготовления металлизационных паст используют биндер, который представляет собой раствор коллаксила в изоамилацетате. Вязкость биндера по прибору ВЗ-4 18—20 с, сухой остаток не более 3%. Отвешенные по рецепту порошки, биндер и органические растворители тщательно перемешиваются в течение 4—8 ч. Наиболее часто смешение производят в стальных барабанах с помощью металлических шаров, масса которых приблизительно в 2 раза больше массы смешиваемых порошков без учета биндера.

При изготовлении металлизационных паст не следует допускать попадания в них влаги, так как даже при незначительном количестве воды происходит коагуляция (свертывание) пасты и ее дальнейшее применение невозможно. Свертывание паст может происходить даже за счет абсорбции паров воды из воздуха. Поэтому их приготовление и использование следует производить в помещениях со строго контролируемой влажностью воздуха.

Примерная рецептура металлизационных паст из расчета на 300 г порошка приведена в табл. 3.

Металлизационные составы наносят на керамические детали кисточкой, пульверизатором, окунанием, шелкографией, а также с помощью металлизационных лент и др.

В зависимости от типа керамического материала и состава пасты толщина наносимого покрытия может колебаться от 30 до 85 мкм, но колебания толщины для одного состава пасты не должны превышать 5 мкм. Поддержание заданной толщины слоя — наиболее трудная задача, решение которой в основном зависит от квалификации исполнителя.

После нанесения покрытия детали поступают на вжигание, которое производится в водородных печах периодического или непрерывного действия. Учитывая, что качество металлизации в печах непрерывного действия более стабильно, в промышленности в основном используют конвейерные печи типа ПВТ-6, К-265.

Схематический разрез такой печи и температурно-газовый режим по каналу печи показаны на рис. 3. Температура вжигания для керамических материалов, содержащих стекло (6—20%), как правило, составляет 1250—1450° С, а с уменьшением количества стекла температура повышается и может достигать 1500—1650° С. Вжигание производят в смеси азота и водорода при соотношении газов от 1 : 3 до 1 : 1, точка росы выходящего из печи газа от +10 до +35° С.

После закрепления первого слоя, состоящего в основном из молибдена (вольфрама), на его поверхность наносят второй слой (никеля, железа, меди) порошковым или гальваническим способом. Порошковые способы нанесения первого и второго слоев аналогичны, при этом изменяется температура вжигания в пределах 960—1200° С, а точка росы водорода должна быть ниже —20° С. Однако ввиду трудоемкости порошковый метод в настоящее время почти не используют и заменяют гальваническим или химическим способом нанесения никеля или железа.

Сравнительную характеристику технологических свойств покрытий при расплавлении различных припоев по режимам, приведенным на рис. 4, можно получить по данным рис. 5, где степень растекаемости припоев равна отношению площади припоя после расплавления S к площади исходного припоя S_0 :

$$K = \frac{S}{S_0}.$$

Гальваническое никелирование и железнение проводят в стационарных ваннах с анодными пластинами из никеля марки НПА-1 (при никелировании) и стали 10 (при железнении) [5].

3. Рецептура металлизационных паст для намазки и опрыскивания

Компоненты пасты	Паста	
	для намазки	для опрыскивания
Молибден, г	240	240
Марганец, г	60	60
Биндер вязкостью 19—20 с, см ³	90	300
Изоамилацетат, см ³	60	—
Ацетон, см ³	—	120

Состав никелевого электролита и режимы работы ванны следующие:

Никель сернокислый, г/л	200—250	Натрий хлористый, г/л	0,5—1,0
Магний сернокислый, г/л	17—25	pH	5,2—5,8
Борная кислота, г/л	10—20	Температура, °C	18—25
Лимонная кислота, г/л	2	Плотность тока, А/дм ²	0,5—1,0

Перед никелированием детали травят в концентрированных серной или соляной кислотах в течение 5—8 с, после чего промывают в проточной и дистиллированной воде. Толщина никелевого покрытия 3—5 мкм.

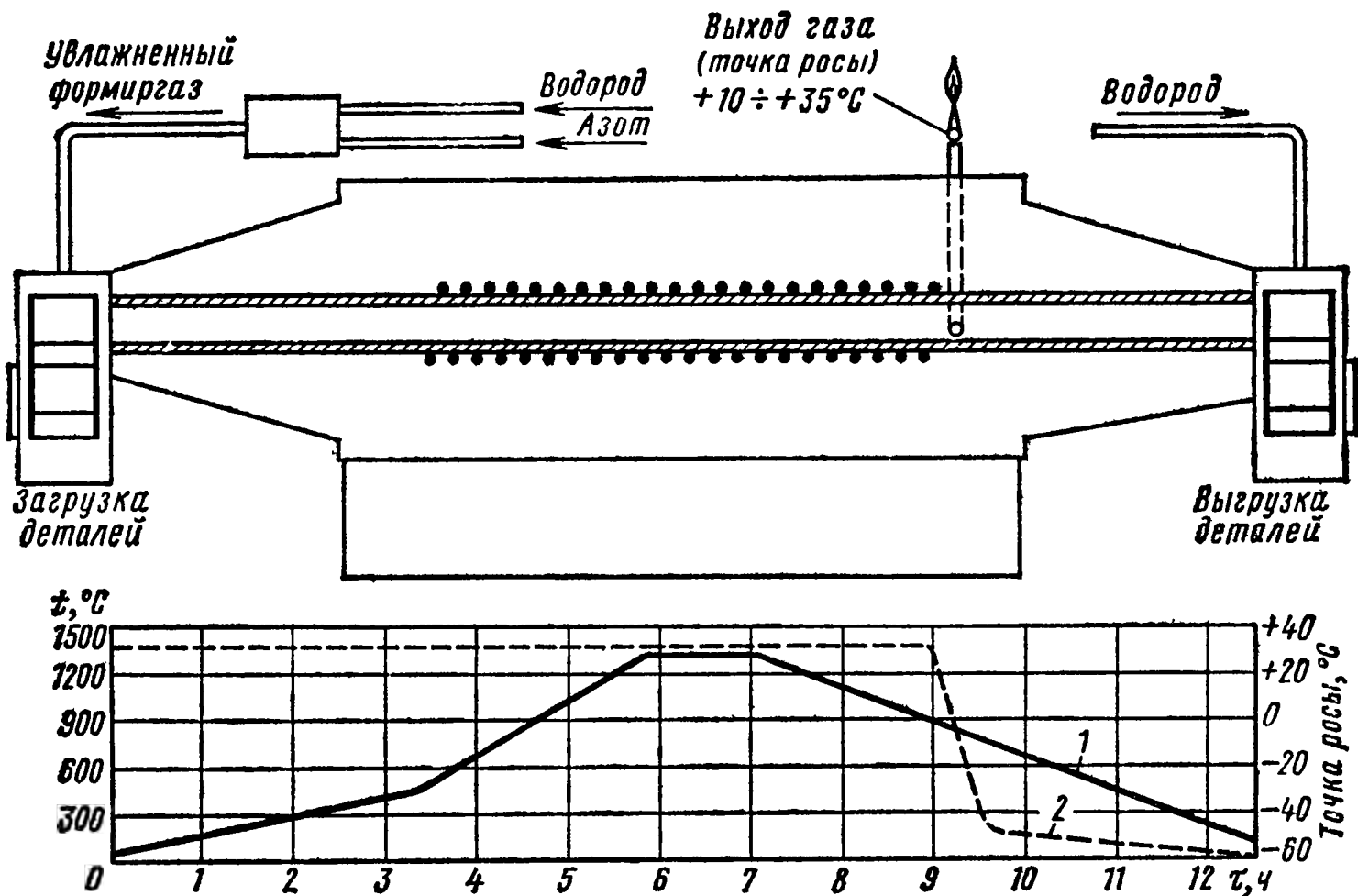


Рис. 3. Схема непрерывно действующей печи для вжигания паст и температурно-газовый режим в канале печи:
1 — температура; 2 — точка росы газов

Состав железного электролита и режимы работы ванны железнения следующие:

Железо хлорное, г/л	600	Аскорбиновая кислота, г/л	0,25
Калий хлористый, г/л	100—120	Температура, °C	18—22
Марганец хлористый, г/л	15—20	Плотность тока, А/дм ²	5

После нанесения покрытия детали выгружают из ванны и промывают в течение 120—180 с в проточной воде. Окончательную отмывку электролита производят ультразвуковой обработкой в дистиллированной воде при 60—70° С в течение 80—180 с. Детали сушат окунанием в ацетон и прогревом в течение 1 ч при 70—80° С.

Никелирование мелких деталей (диаметром 1—3 мм) гальваническим способом затруднено, поэтому применяют химическое никелирование.

Состав и режим работы ванны для химического никелирования следующие:

Никель хлористый, г/л	40—50	Натрий гипофосфит, г/л	10—20
Аммоний хлористый, г/л	40—50	pH	8,0—8,5
Натрий лимоннокислый, г/л	40—50	Температура, °C	80—85
		Время, мин	15—20

Перед никелированием детали травят в смеси соляной и азотной кислот в течение 4—8 с и промывают в дистиллированной воде. Участки, подлежащие никелированию, активируют алюминием, прикасаясь к металлизационному слою мягкой проволокой.

После никелирования детали тщательно промывают в проточной воде.

Сборку металлокерамических узлов, как правило, выполняют без использования каких-либо приспособлений, лишь при плотной посадке манжет на цилиндриче-

ские керамические детали применяют ручные рычажные или винтовые прессы. При этом натяг манжеты на керамику не должен превышать 0,1—0,15 мм, так как иначе могут возникнуть сколы керамики и металлизационного слоя.

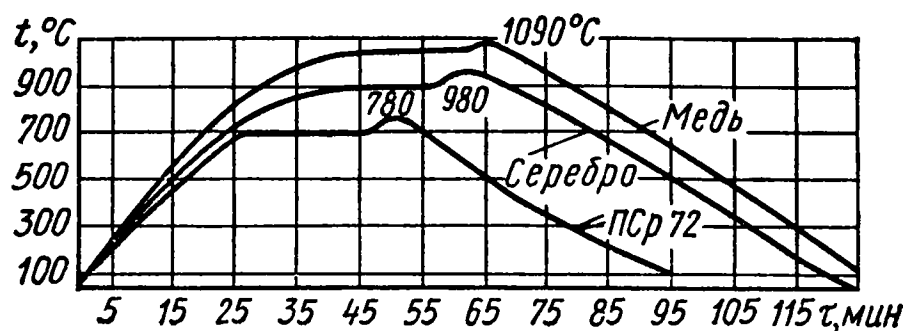
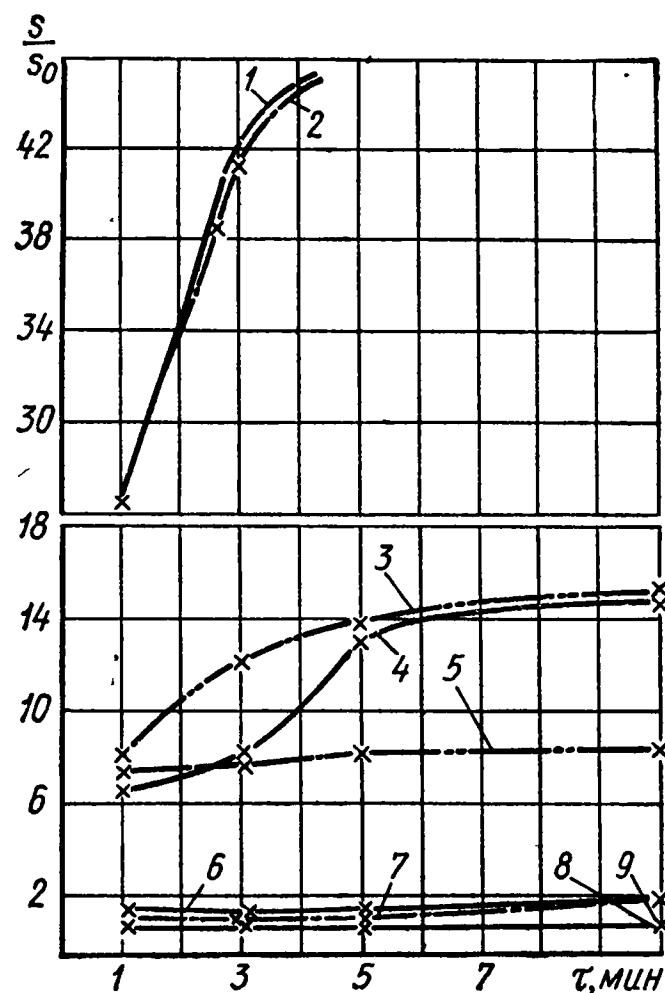


Рис. 4. Режимы расплавления припоев на поверхности металлизационных слоев

Рис. 5. Растекаемость припоев по различным металлизационным слоям:

1 — медь по железу; 2 — серебро по никелю; 3 — ПСр 72 по железу; 4 — медь по никелю; 5 — ПСр 72 по никелю; 6 — медь по Мо — Мп; 7 — серебро по железу; 8 — серебро по Мо — Мп; 9 — ПСр 72 по Мо — Мп



Для получения качественного соединения существенное значение имеет размещение припоя. Примеры правильного и неправильного положения припоя относительно шва показаны на рис. 6.

В торцовых соединениях на надежность также влияют сортамент припоя (проволока или фольга) и толщина фольги. Во всех узлах, где это представляется воз-

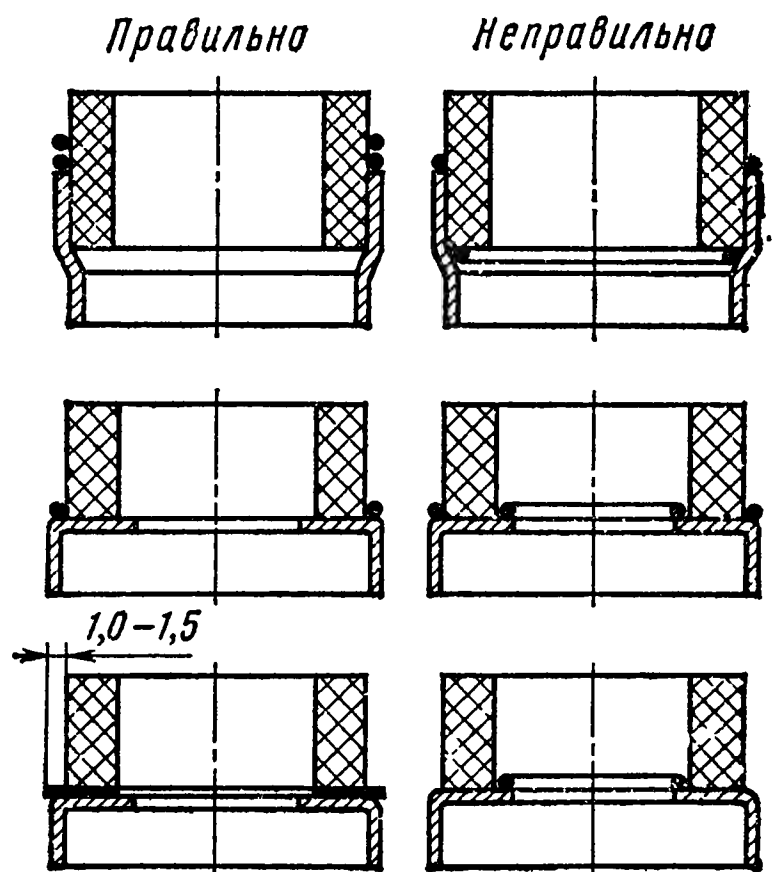


Рис. 6. Расположение припоя

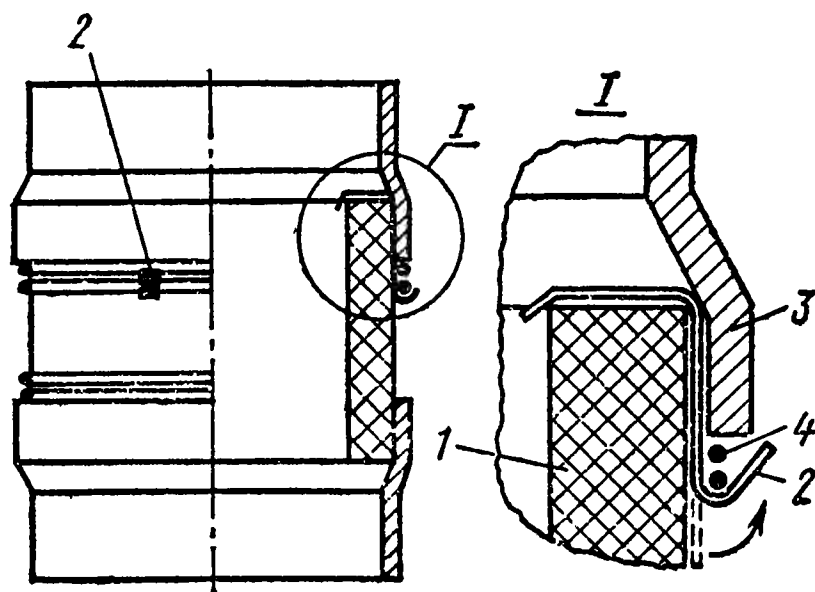


Рис. 7. Потолочное (верхнее) закрепление припоя в телескопических соединениях керамики с металлами:

1 — керамика; 2 — фольга припоя; 3 — манжета; 4 — припой

можным, целесообразно применять припой в виде проволоки. Термостойкость торцовых соединений медных манжет с керамикой 22-хс в случае использования припоя в виде проволоки ПСр 72 на 20—35% выше, чем при использовании фольги из этого же материала.

В тех случаях, когда невозможно применить проволоку, кольцо фольги должно выходить за зону шва на 1—1,5 мм, что в некоторой мере способствует капиллярному заполнению шва, так как припой начинает плавиться и постепенно фронт плавления припоя проходит с внешней к внутренней стороне шва (в случае пайки в печах с наружным расположением нагревательных элементов по отношению к шву).

В телескопических соединениях керамики с металлом необходимо, чтобы металлизационный слой выходил за манжету на 0,5—1,0 мм, иначе будет отсутствовать капиллярный эффект и припой не заполнит шов.

«Потолочное» закрепление припоя в телескопических соединениях осуществляется с помощью 3—4 полосок фольги из припоя, которые закрепляются на керамике манжетой (рис. 7).

Почти все металлокерамические узлы, кроме простейших цилиндрических с небольшим диаметром в пределах 30—35 мм, паяют в специальных оправках. Оправки

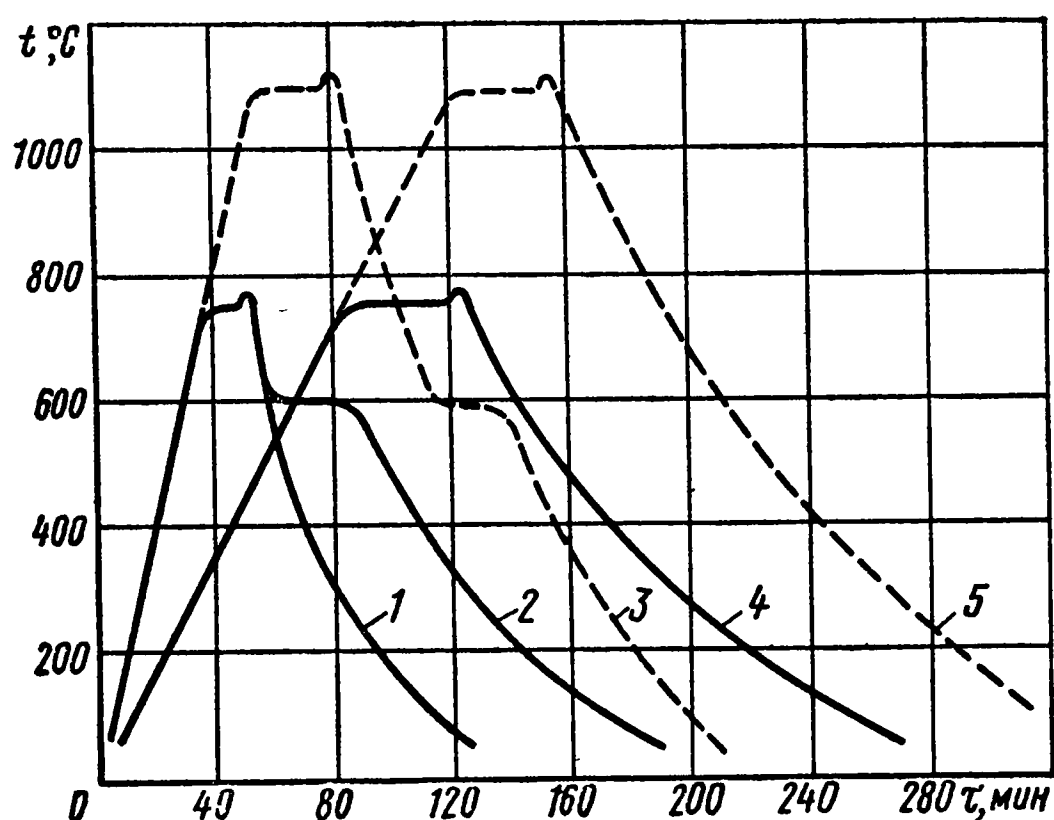


Рис. 8. Режимы пайки металлокерамических узлов медью и медно-серебряной эвтектикой
1—3 — изделия простой формы размером до 100 мм, манжеты медные (1) и коваровые (2, 3);
4—5 — изделия сложной формы или размером до 250 мм

изготавливают из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Перед пайкой ее окисляют отжигом в среде водорода с точкой росы от -20 до $+10^{\circ}\text{C}$ при 1100°C .

Пайку узлов осуществляют в печах с защитной атмосферой как периодического, так и непрерывного действия. Широко применяют печи периодического действия, например, А-560-13, ИО59004, ИО59008, СКБ-7002, ЦЭП-240 и др.

Режимы пайки металлокерамических узлов существенно отличаются от режимов, применяемых при пайке металлов. Это объясняется спецификой физико-химических процессов, протекающих при пайке металлизированной керамики, свойствами керамического материала, а также термомеханическими напряжениями, возникающими в соединении.

Качество соединения металла с керамикой в основном определяется следующими элементами: скоростью нагрева (временем подъема температуры), длительностью контакта расплава припоя с поверхностью металлизации (временем выдержки), температурой пайки и скоростью охлаждения. Режимы пайки в зависимости от сложности и габаритов керамических деталей, а также типа конструкционного материала манжет для медного и медно-серебряного припоев приведены на рис. 8. Пайку другими припоями в интервале температур 780 — 1100°C следует производить по аналогии с режимами, приведенными на рис. 8. Следует при этом отметить, что для повышения производительности оборудования необходим дифференцированный подход к выбору режимов пайки. Чем меньше габариты узла и выше пластичность припоя и материала манжет, тем с большими скоростями можно охлаждать узлы.

Основными параметрами при пайке металлизированной керамики являются время выдержки и температура, от них в значительной мере зависит последующая эксплуатационная надежность соединений. Это объясняется сложной природой покрытия, которое состоит из спеченного тугоплавкого (в большинстве случаев молиб-

денового) каркаса, заполненного межзерновым неметаллическим веществом (стекло и продукты взаимодействия активных добавок с окислами керамики).

Межзерновое вещество при температуре выше 1000° С размягчается и при повышении температуры приобретает все более значительную подвижность. В связи с этим температура пайки высокоглиноземистых керамических материалов с содержанием Al₂O₃ в пределах от 90 до 96%, металлизированных молибден-марганцевой пастой, ограничена 1100° С. Практически наиболее высокотемпературным припоем, пригодным для пайки такой керамики, может служить чистая медь. Однако иногда медь вытесняет межзерновое вещество, которое при незначительной выдержке (30—40 с) остается в паяном шве, а с ее увеличением до 60—300 с (в зависимости от типа керамического материала и состава металлизационного покрытия) выходит на поверхность паяного шва в виде отдельных стеклообразных капель.

Процесс замещения межзернового вещества припоем сопровождается значительным ослаблением связи металлизационного слоя с керамикой и возникновением дефектов в покрытии и паяном шве, что приводит к снижению термомеханических свойств металлокерамических соединений. Поэтому во всех случаях металлизированную керамику необходимо паять при минимально возможных температурах и выдержках. Практически принято вести процесс пайки при температурах не более (*t*_{пл} + 20)° С. Время выдержки после расплавления припоя от 30 до 60 с.

4. Рекомендуемое время выдержки и температура пайки металлизированной керамики с металлами

Металлизационное покрытие — металл	Припой	Режим пайки		Примечание
		<i>t</i> , °С	<i>τ</i> , с	
Молибден-марганцевое покрытие (Мо-Мп) без второго слоя — ковар МоМп + второй слой Fe — ковар МоМп+Ni — ковар	Медь МоБ	1083—1090	30—40	При увеличении времени выдержки до 120 с в 2 раза уменьшается термостойкость Менее зависимо от длительности выдержки - Даже при оптимальном режиме термостойкость в 2 раза меньше, чем в предыдущем случае При увеличении температуры и времени выдержки резко ухудшается качество соединения Допустима выдержка до 2—3 мин и температуры на 100—150 °С Лучший припой для пайки керамики Наиболее надежные соединения Сильно растворяется медь
	Медь МоБ	1083—1100	30—90	
	Медь МоБ	1083—1100	30—60	
	ПСр ПдМКБ 65-15-19В	900—910	30—40	
	ПЗлМ35В	1020—1040	45—60	
	ПСр 999В *	960—1000	30—120	
	ПСрМПд 59-31-10В	850—860	30—90	
	ПСрМПд 68-27-5В	810—860	30—120	
	ПСр-72В *	780—810	30—150	
	ПСрМОГл 70-27-2-1В	750—810	30—300	
МоМп+Ni--армко	Медь МоБ	1083—1100	30—90	
	ПЗлМ 35В	1020—1040	45—60	
	ПСр 999 *	960—1020	30—150	
МоМп+Ni — медь МоБ	ПЗлМ35В	1000—1010	30—40	
	ПСрМПд 59-31-10В	850—860	30—90	
	ПСрМПд 68-27-5В	810—860	30—120	
	ПСр 72В	790—810	30—120	
	ПСрМОГл 70-27-2-1В	750—810	30—150	

* Спаиваемый с керамикой металл следует никелировать.

В табл. 4 даны рекомендуемые припои и условия пайки для различных сочетаний металлизированная керамика — металл, при этом в каждом сочетании припои

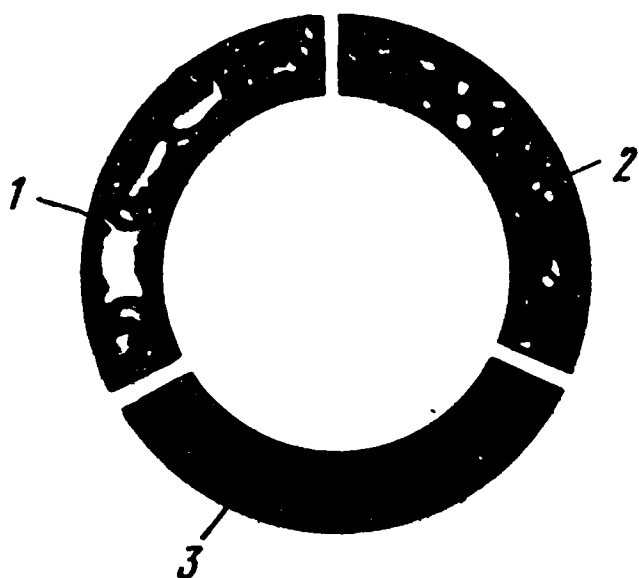


Рис. 9. Рентгеновские снимки торцовых соединений керамики с медными манжетами, выполненных различными припоями: 1 — ПСр 72 (фольга); 2 — ПСр 72 (проволока); 3 — ПСр МК672В (фольга)

расположены в порядке возрастания вакуумно-термических свойств металлокерамических соединений. Из всех указанных припоев наиболее широко применяют ПСр 72 для пайки меди и кобальта, медь Моб для пайки кобальта и Ср 999 для пайки низкоуглеродистых сталей и железа. Недостатком самого распространенного припоя ПСр 72 является значительное количество «непропаев» (пор), которые снижают механические и термические характеристики соединений керамики с металлами и особенно керамики с медью, где они проявляются в более явной форме. Структура шва существенно улучшается при замене обычной медно-серебряной эвтектики припоем ПСрМК672В, аналогичным припоем ПСр 72, но содержащим до 0,5% Со. Соединения металлизированной керамики с медью, полученные с помощью припоя ПСрМК672В, имеют беспористую структуру шва (рис. 9).

АКТИВНАЯ ПАЙКА

Вторым наиболее распространенным методом получения соединений металла с керамикой является метод активной пайки или «одноступенчатый метод». Сущность его заключается в использовании титана и циркония в качестве активных составляющих металлического припоя. Титан и цирконий способствуют растеканию припоя по поверхности керамики. Можно выделить три наиболее характерные разновидности этого метода:

1) пайку керамики непосредственно с титаном или цирконием, при этом активные компоненты переходят в припой в результате растворения металлических манжет, соединяемых с керамикой;

2) пайку керамики с предварительным нанесением на место соединения порошка активного металла или его гидрида;

3) пайку керамики с применением активных припоев, т. е. припоев, содержащих титан или цирконий.

Основным достоинством одноступенчатого метода является его простота, так как не требуется предварительная металлизация керамики. Однако метод активной пайки имеет недостатки. Процесс пайки необходимо проводить либо в вакууме 10^{-5} мм рт. ст., либо в среде инертного газа, не содержащего кислород и пары воды (кислорода не более 0,0001% по объему, точка росы не выше -70°C). Температурные коэффициенты линейного расширения керамики и металла должны быть близкими во всем диапазоне температур. Несмотря на кажущееся разнообразие способов активной пайки, в основе протекающих процессов лежит взаимодействие активного металла с окислами керамики, при этом титан (цирконий), являясь межфазно-активной добавкой, растворяясь в припое, обеспечивает растекание активного сплава по поверхности неметаллизированной керамики.

Титан образует эвтектические сплавы почти со всеми металлами. Поэтому при пайке по активной технологии во всех случаях образуются высокоактивные сплавы, взаимодействующие с неметаллизированной керамикой и обеспечивающие прочное соединение металла с диэлектриком. Химическая природа протекающих при этом процессов заключается в следующем. Активные металлы при контакте с керамическими окислами в условиях вакуума и повышенных температур частично их восстанавливают с образованием в пограничной зоне сложных растворов внедрения и замещения. Исследованиями [17] взаимодействия чистых окислов Al_2O_3 и SiO_2 с титаном показано, что Al_2O_3 , частично восстанавливаясь при 950°C , отдает кристаллической решетке титана кислород с образованием твердого раствора внедрения. В свою

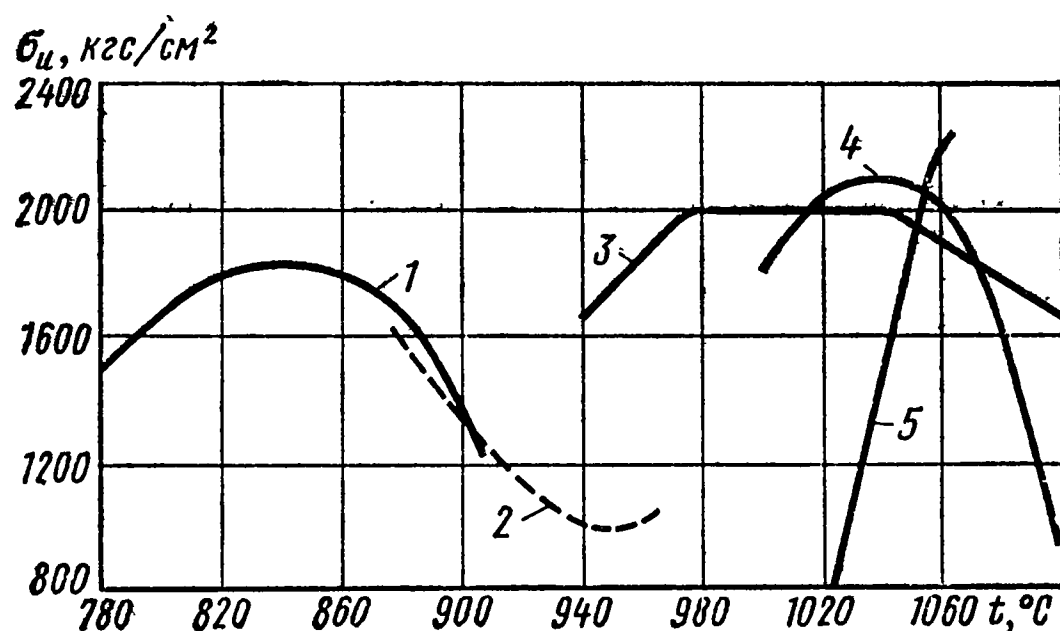
очередь, алюминий, освободившийся при восстановлении Al_2O_3 , также растворяется в титане, но с образованием твердого раствора замещения.

При взаимодействии SiO_2 с титаном образуется твердый раствор кислорода в титане и появляются интерметаллические соединения титана с кремнием, так как последний не дает твердых растворов с титаном.

Указанные процессы являются определяющими в механизме образования металлокерамических соединений по активной технологии, а припой облегчает перенос активного металла к керамике и, кроме того, заполняет зазоры между керамикой и металлом. При выборе припоев и режимов пайки следует учитывать возможность возникновения хрупких интерметаллических соединений между припоем и титаном, которые снижают надежность соединения.

Исследования влияния состава припоя на прочность соединений керамики 22-хс с титаном ВТ1 подтвердили возникновение интерметаллических прослоек в шве

Рис. 10. Зависимость прочности соединений керамика 22-хс — титан ВТ-1 от температуры пайки различными припоями: 1 — ПСр 72; 2 — медь; 3 — медно-никелевый сплав (Cu55, Ni45); 4 — никель НП-2; 5 — кобальт



[16]. Как видно на рис. 10, с повышением температуры пайки медно-серебряной эвтектикой прочность снижается и, начиная с $880^\circ C$, кривая совпадает с прочностью соединений, выполненных медным припоем. Это объясняется тем, что при температурах ниже $840\text{--}860^\circ C$ в шве отсутствуют интерметаллические соединения меди с титаном, так как температура их образования несколько выше. Аналогично при повышении температуры пайки до $1100^\circ C$ в случае никелевого припоя снижается механическая прочность за счет интерметаллических соединений титан — никель.

При использовании титана в качестве конструкционного материала манжет процесс получения металлокерамических узлов сводится к сборке и пайке. В соединениях с титаном наиболее широко применяют форстеритовую керамику, термический коэффициент линейного расширения которой практически такой же, как у титана. На базе этой керамики освоен массовый выпуск металлокерамических электровакуумных ламп. На базе циркония разработан сплав ЦНТ-3, который удовлетворительно совпадает по термическому расширению с керамическими материалами типа М-7, 22-хс, сапфирит и может с успехом применяться в металлокерамических соединениях. Хорошие результаты получены при пайке никелевым припоем в виде фольги толщиной $10\text{--}20$ мкм или гальванического покрытия толщиной $5\text{--}10$ мкм [16].

При использовании гидрида титана технологический процесс получения соединений заключается в нанесении гидрида титана на очищенную керамическую деталь, сборке и пайке.

Пасту из порошка гидрида титана готовят аналогично металлизационным пастам. Методы нанесения: кисточкой, опрыскиванием, металлизационной лентой.

После высыхания и закрепления пасты керамическая деталь пригодна для сборки в узел. В некоторых случаях для удобства монтажа после нанесения гидридной пасты детали предварительно помещают в вакуумную печь и спекают пасту (металлизация титаном), после чего производят окончательную сборку.

Для пайки можно применять припой в виде фольги и проволоки. Для ограничения его растекания по поверхности керамики титановую пасту наносят с выходом за зону соединения на $1,0\text{--}1,5$ мм.

В процессе сборки открытые поверхности керамических деталей целесообразно покрывать слоем суспензии, состоящей из биндера и тонкоизмельченной окиси алюминия, которая предохраняет керамику от напылений припоя в процессе пайки. После окончания процесса пайки покрытие легко удаляется струей воды. В случае напыления припоя резко снижается поверхностное сопротивление керамической детали. Его можно восстановить пескоструйной обработкой или обработкой детали мелким карборундом в струе воды или сжатого воздуха.

Третий способ — пайка с использованием активного припоя. В этом случае получение соединения сводится к сборке и пайке. Следует, однако, отметить, что ввиду хрупкости соединений титана с большинством металлов активные припои трудно получить, поэтому часто используют проволоку или фольгу с сердечником из активного металла. Иногда применяют пастообразные припои, состоящие из смесей гидридов активных металлов и порошков соответствующих металлов. В некоторых случаях для облегчения сборки и более точной дозировки припоя из смеси порошков активного металла (гидрида) и металла с необходимой температурой плавления пресуют круглые шайбы.

Применяя гидриды титана (циркония) и активные припои, можно получать металлокерамические соединения со многими конструкционными материалами без металлизации керамики, однако в любом случае следует иметь в виду, что чем ближе значения температурных коэффициентов линейного расширения керамики и металла, тем более надежны узлы в последующей эксплуатации.

В табл. 5 указаны припои и оптимальные режимы пайки по активной технологии.

5. Припои и режимы пайки при соединении керамики с металлами по активной технологии

Припой	Режим пайки		Примечание
	t, °C	τ, с	
ПСр-72	820	120—240	С активным металлом или гидридом
Медь	880	60—180	То же
Медно-никелевый сплав Ni 70; Cu 30	960—980	120—360	»
Медно-никелевый сплав Ni 45; Cu 55	980	300—480	»
Никель	1040	120—300	»
Кобальт	1060	90—120	»
Палладий	1100	90—120	»
Биметаллы			
Ag 85 (оболочка), Zi 15 (сердечник)	970	90—240	С любым металлом
Cu 77 (оболочка), Ti 23 (сердечник)	880	60—180	» » »
Активные припои			
Медно-титано-никелевый (Ti 20; Ni 5; Si 0,1, Fe 0,1; Cu — остальное)	990—1000	180	С любым металлом
Титано-никелевый (Ti 50; Ni 50)	1250	210	» » »
Порошковые припои			
Медно-серебряно-титановый (Ti 10; ПСр72 — 90%	820	120—240	С любым металлом
Золото-вольфрамо-титановый (Au 64; W 20; Ti 16)	1490—1500	60—120	» » »

Для пайки металлокерамических узлов по активной технологии можно использовать любое вакуумно-термическое оборудование, обеспечивающее вакуум 10⁻⁵ мм рт. ст. и заданную температуру. Источниками тепла могут быть высокочастотные генераторы, например, в установке вакуумного отжига типа А-511-09 или молибденовые (вольфрамовые) нагреватели в печах ИО59008, ИО59007 и др.

ПАЙКА КЕРАМИКИ С МЕТАЛЛАМИ СТЕКЛОПРИПОЕМ

Соединение керамики с металлами тонкими прослойками стекла — наиболее старый способ получения металлокерамических неразъемных соединений. Вначале для этих целей использовали стекла промышленных марок, эмали или глазури, затем были разработаны специальные составы высоко- и низкотемпературных стеклоприпоев.

По химическому составу стеклоприпой представляют собой смеси окислов металлов, имеющие температурные коэффициенты линейного расширения такие же как у керамики и необходимые температуры размягчения. Получение металлокерамических соединений стеклоприпоем основывается, с одной стороны, на хорошей адгезии керамики и стеклоприпоя, которая обусловлена тем, что керамика содержит окислы, близкие по свойствам, или те же, что и припой, а с другой стороны, на том, что процессы пайки проводят в таких условиях, когда на металле появляется тонкая пленка окисла, которая способствует хорошему адгезионному сцеплению стеклоприпоя с металлом.

Разновидностями стеклоприпоев являются стеклокристаллические припой (стеклоцементы), которые отличаются от стеклоприпоев тем, что при нагреве до определенной температуры кристаллизуются. При этом существенно повышаются температуры размягчения стеклоприпоя, что позволяет нагревать узлы после пайки почти до той же температуры, что и в процессе пайки.

Для пайки в окислительной среде пригодны стеклоприпой системы $\text{SiO}_2 - \text{ZnO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{PbO}$, а также припой системы $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}$ с более высокой температурой эксплуатации.

Для пайки в восстановительной среде стеклоприпой не должны содержать легковосстанавливающихся окислов металлов, поэтому, как правило, применяют стеклоприпой на базе следующих окислов: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MnO , MgO и BaO .

Получение стеклоприпоев сводится к приготовлению шихты, варке и измельчению стеклообразной массы в порошок. Припой варят в корундовых или платиновых тиглях. После осветления массы жидкий стеклоприпой выливают в холодную воду. Затем гранулы припоя размалывают в спирте в фарфоровых или яшмовых барабанах. Из тонкоизмельченного порошка стеклоприпоя изготавливают припойные кольца путем протягивания, прессования или прокатывания ленты и последующей штамповки.

В некоторых случаях для придания кольцам стеклоприпоя большей механической прочности их спекают при температуре на $200-300^\circ\text{C}$ ниже, чем температура последующей пайки.

Однако чаще всего стеклоприпой используют в виде пастообразных смесей, которые наносят на поверхности сопрягаемых деталей.

В табл. 6 даны составы некоторых стеклоприпоев для пайки в восстановительной среде.

Пайку при температуре до 1000°C осуществляют в окислительной среде в любых печах, обеспечивающих достижение заданной температуры. В конструктивном отношении целесообразнее сопряжение поверхности деталей делать конусным.

На рис. 11, а показано ненапряженное соединение изолятора из высоковольтного фарфора ($\alpha = 45 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^\circ\text{C}$) с коваром и напряженное (рис. 11, б); арматура из высокохромистой стали ($\alpha = 100 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^\circ\text{C}$) изолятор — стеатитовая керамика. При изготовлении узлов наносят 1—2 слоя стеклоприпоя на керамическую и металлическую детали в месте соединения. Затем оплавливают каждый слой в печи. После этого наносят последний тонкий слой стеклоприпоя и без спекания производят сборку по коническим поверхностям.

Собранный узел поступает на окончательную пайку. Под действием сжимающего груза в момент размягчения стеклоприпоя происходит посадка конусных обоем на изолятор с образованием тонкого слоя припоя между металлом и керамикой.

При высокой температуре плавления стеклоприпоев пайку производят в восстановительной или нейтральной среде с использованием манжет из тугоплавких металлов и сплавов, например, вольфрама, молибдена и сплавов вольфрама и молибдена с рением. Последние предпочтительнее, так как обладают более высокой температурой рекристаллизации.

Высокотемпературные соединения тугоплавких металлов с керамикой, паянные стеклоприпоями, широко применяют при изготовлении многожильных вакуумно-плотных разъемов, когда другие способы пайки трудно использовать. При этом чаще всего внутренние проводники впаивают в керамику с помощью стеклоприпоя, а керамическое основание в металлический фланец — с помощью других методов пайки.

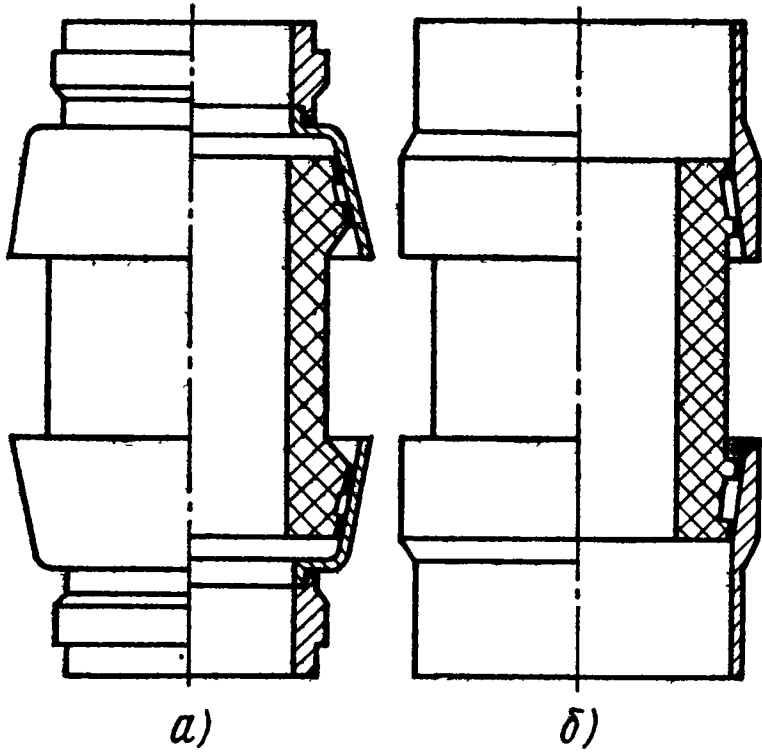


Рис. 11. Конусные металлокерамические соединения, выполненные стеклоприпоями:
а — ненапряженное; б — напряженное

6. Химический состав стеклоприпоев на основе трудновосстанавливаемых окислов и температура пайки

Химический состав, %					Температура пайки, °С
Al ₂ O ₃	CaO	SiO	MgO	MnO	
13	—	50	—	17	1150
13	—	35	—	52	1160
19	—	29	—	52	1200
18	42	40	—	—	1300
—	38	56	6	—	1400
52	48	—	—	—	1450
35	—	50	15	—	1500
44	—	41	15	—	1600
18,5	9,2	62,9	9,4	—	1300

Так, например, широко используют метод одновременного впаивания штырьков и металлизации керамической детали. В этом случае подбирают такой стеклоприпой, чтобы температура пайки совпадала с температурой металлизации. Металлокерамические узлы, полученные этим способом, имеют близкий к 100% выход годных и обладают значительной термостойкостью.

ПАЙКА КЕРАМИКИ С МЕТАЛЛОМ
БЕЗ СПЕКАНИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИОННОГО СЛОЯ

Этот способ соединения сводится к нанесению на керамическую деталь металлизационной пасты и последующей пайке медью или медно-золотыми припоями. Основными условиями получения соединений являются смачиваемость припоем сырого металлизационного слоя и химическая реакция между керамикой и покрытием. Составы металлизационных паст: обыкновенная молибден-марганцевая паста (Мо 80; Мп 20) и молибден-марганцевая паста с добавкой титана или двуокиси титана (Мо 80; Мп 15; TiO₂ 5). Пайку узлов следует проводить в водороде или формиргазе с точкой росы от -20 до +5° С, т. е. в таком температурно-газовом режиме, когда имеется возможность окисления компонентов пасты, но в то же время обеспечивается удовлетворительное смачивание сопрягаемых деталей жидким припоем. В качестве конструкционного металла применяют ковар, реже молибден и медь.

ПАЙКА НЕМЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ
С МЕТАЛЛАМИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Данный способ в значительной степени напоминает диффузионную сварку. Процесс получения соединений сводится к сборке узла, расплавлению припоя с выдержкой 3—5 мин без давления и с последующей выдержкой под давлением в течение 8—10 мин. Затем снижается температура и охлаждается узел под давлением 0,4—0,5 кгс/мм² до комнатной температуры [3]. Так же как и для диффузионной сварки, в этом случае конструкции соединений торцовые компенсированные. В качестве материала манжет могут быть использованы ковар, железо-никелевые сплавы и молибден при пайке медью и медь при пайке ПЗлМ35,

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
 ДЛЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ УЗЛОВ

Противоположность свойств и специфика процессов, протекающих при пайке металла с керамикой, в значительной мере отражаются на конструктивных формах соединений. При этом следует учитывать следующее:

1) разность температурных коэффициентов линейного расширения соединяемых материалов. В настоящее время нет материалов, освоенных металлургической и керамической промышленностями для хорошо сочетающихся пар, исключением в какой-то мере является титан-форстерит;

2) малую пластичность керамических материалов, характеризующихся низкой ударной прочностью, высоким модулем упругости и хрупким разрушением образцов. Все керамические материалы, обладая высокой прочностью на сжатие, способны аккумулировать в малом объеме значительную энергию, которая реализуется в форме взрывного процесса в дефектных областях системы, захватывая при этом близлежащие зоны с выделением энергии в локализованной области. Указанные недостатки керамических материалов можно снизить равномерным и статически распределенным нагружением с плавными переходами от ненагруженных областей к нагруженным;

3) малую прочность керамических деталей при растяжении, что приводит к резкому ограничению конструктивных форм металлокерамических соединений.

В настоящее время исследована определенная группа материалов, которые можно применять для изготовления металлокерамических узлов. В табл. 7—10 приведены химический состав и свойства керамических материалов, а также свойства металлов и сплавов, которые используют в соединениях с керамикой [1, 2, 4, 5, 8, 10, 15]. Пары выбирают с учетом условий эксплуатации узлов и свойств соединяемых материалов. При этом следует учитывать, что чем меньше предел текучести металла, тоньше металлическая манжета и меньше разница в температурных коэффициентах линейного расширения сопрягаемых материалов, тем более благоприятны условия для получения надежных соединений.

7. Химический состав керамических материалов

Тип керамики ¹	Марка	Расчетный химический состав, % (по массе)						
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	B ₂ O ₃	BaO	Прочие
Алюмооксидная	Поликор	99,7	—	—	0,3	—	—	—
	Сапфирит	98,0	—	—	0,5	1,5	—	—
	ГМ	99,6	0,03	—	0,3	—	—	0,07
	А-995	99,6	0,05	—	0,2	0,05	—	0,10
	Стоал	99,9	0,03	—	—	—	—	0,07
	ЦМ-332	99,0—99,2	0,03—0,05	—	0,6—1,0	—	—	0,1—0,07
	22-хс	94,4	2,76	—	—	—	—	Cr ₂ O ₃ 0,47 MnO 2,35
	М7 ВГ-IV	94,2 95,3	3,70 3,3	2,1 0,2	— 1,2	— —	— —	— —
Стеатитовая	СК-1	0,99	54,22	—	28,60	2,15	15,40	0,79
	СПК-2	6,71	63,52	2,02	26,20	—	—	1,55
	ТК-21	5,70	59,76	6,22	27,35	—	—	0,97
	СНЦ	1,37	53,00	0,16	27,70	—	11,40	1,02 ZnO 5,35
Форстеритовая	ЛФ-11	0,8	41,7	—	51,5	—	6,0	—
	КВФ-4	4,3	41,6	—	46,4	—	7,7	—
	17	2,6	44,0	0,6	45,0	—	7,8	—
Высоковольтный фарфор	МЗА	25,0	68,29	0,68	0,3	—	—	5,75

¹ Состав бериллиевой керамики (брокерит-9); окись бериллия 97%, минерализирующая добавка 3%.

8. Свойства керамических материалов при 20 °С

Марка керамики	Объемная масса, г/см ³	Прочность при статическом изгибе, не менее, кгс/см ²	Модуль упругости, $E \cdot 10^{-4}$, кгс/мм ²	Коэффициент теплопроводности, Вт/м · °С	Диэлектрические свойства, $f = 5,5 \cdot 10^9 - 10^{10}$ Гц		Удельное объемное сопротивление, Ом · см не менее
					Проницаемость не более, ϵ	Потери, $\text{tg} \delta \cdot 10^{-4}$	
Поликор	3,96—3,99	2500—3500	—	25,0—32,2	10,0—10,4	< 1,0	> 10 ¹⁴
Сапфирит	3,89—3,94	3000—4000	3,3—4,4	21,0—25,0	9,3—9,6	< 1,0	> 10 ¹⁴
ГМ	3,88—3,94	2500—3400	—	16,7—25,0	9,8	< 1,0	10 ¹⁴ при 100 °С
А-995	3,88	3500	—	16,7—18,8	9,7	1,0	> 10 ¹⁴
Стоал	3,75	3000	3,74—3,80	—	9,7 при $f = 10^6$ Гц	13 при $f = 10^6$ Гц	7,4 · 10 ¹⁵
ЦМ-332	3,96—3,98	3050—6500	—	17,5	—	—	10 ¹⁵
22-хс	3,65—3,85	3200	3,14	14,6 при 100 °С	9,3—9,6	4,0—10,0	10 ¹⁴
М-7	3,67—3,75	3400—3800	—	—	8,6—9,5	9,0	—
ВГ-IV	3,65	3100	—	—	9,4	8,0	—
Брокерит-9	2,83	1500	3,0	92 при 200 °С	7,0	6,0	> 10 ¹⁴
СК-1	3,00	1700	—	—	6,0 при $f = 10^6$ Гц	6,0 при $f = 10^6$ Гц	10 ¹⁵ при 100 °С
СПК-2	2,66	1200	—	—	6,1 при $f = 10^6$ Гц	25 при $f = 10^6$ Гц	8 · 10 ¹³ при 100 °С
ТК-21	2,61	1900	—	—	5,5 при $f = 10^6$ Гц	15 при $f = 10^6$ Гц	10 ¹³ при 100 °С
СНЦ	3,00	1700	—	—	7,0 при $f = 10^6$ Гц	3 при $f = 10^6$ Гц	3 · 10 ¹⁴ при 100 °С
ЛФ-11	2,93—3,20	1400	—	—	7,1 при $f = 10^6$ Гц	5,0 при $f = 10^6$ Гц	10 ¹³
КВФ-4	2,90—3,16	1700—1800	1,5	—	6,7 при $f = 10^6$ Гц	5,0 при $f = 10^6$ Гц	—
17	2,48	1700	—	—	6,9 при $f = 10^6$ Гц	5,0 при $f = 10^6$ Гц	—
Высоковольтный фарфор по нормам ОИИ643000-62	—	600	—	1,25	7,0 при $f = 50$ Гц	350 при $f = 50$ Гц	10 ¹²

9. Свойства металлов и сплавов, применяемых для соединения с керамикой, при 20 °С

Материал	Объемная масса, г/см³	Температура плавления, °С	Предел текучести, кгс/мм²	Модуль упругости E · 10⁻⁴, кгс/мм²	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Удельное сопротивление, Ом · м
Ковар	8,3	1450	36	1,48	18,7	5 · 10⁻⁷
Н-42	8,2	1450	20	1,48	14,6	66 · 10⁻⁸
Н-46	8,2	1450	—	—	15,5	54 · 10⁻⁸
Медь	8,94	1083	5—7	1,17—1,26	346	(17—18) · 10⁻⁹
Низкоуглеродистая сталь НЖ	7,87	1532	7—14	2,1	73	9,7 · 10⁻⁸
Сталь 03Х18Н12ВИ	7,9	1400	25—27	2,0	13,7	73 · 10⁻⁸
Вольфрам	19,3	3410	72—83	2,58—3,50	130	(5,5—8,3) · 10⁻⁸
Молибден	10,22	2620	59	2,6—3,2	159	4,8 · 10⁻⁸
Тантал	16,6	2996	34	1,9	45,4	13 · 10⁻⁸
Ниобий	8,6	2415	17	0,87	52,4	16 · 10⁻⁸
МД15НП	—	—	32	2,5	79	(6,0—9,4) · 10⁻⁸
МД32НП	—	—	23	1,8	89,5	9,0—10⁻⁸
ЦНТ-3	7,0	—	63	0,77—0,80	21,0	—
МР-47ВП	13,3	~ 2500	28,4	3,46	43,0 при 300 °С	21,1 · 10⁻⁸
ВР-27ВП	20,0	~ 3000	—	4,18	54,0 при 1127 °С	(27—28) · 10⁻⁸
Цирконий	6,5	1857	8—14	0,63—0,84	16,7	(41—60) · 10⁻⁸
Титан	4,5	1665	44	1,18	16,7	(47—79) · 10⁻⁸

10. Температурные коэффициенты линейного расширения материалов, используемых в металлокерамических узлах

Материал	Значения α · 10⁷ в интервале температур, °С							
	20—200	20—300	20—400	20—500	20—600	20—700	20—800	20—900
Керамика								
Поликор	69	76	78	79	80	81	83	86
Сапфирит	67	68	74	78	80	83	85	86
ГМ	62—66	—	—	—	—	—	—	78
А-995	62	—	—	—	—	—	—	75
Стоал	—	—	—	—	—	—	—	75 ± 5 (20—1000 °С)
ЦМ-332	—	—	—	—	—	—	85	—
22-хс	62	68	71	73	75	76	78	80
М-7	61	64	67	69	72	75	78	80
ВГ-IV	62	66	70	73	75	78	79	82
Брокерит-9	—	72	—	—	—	—	—	82—86
СК-1	65	—	—	—	—	—	—	—
СПК-2	59	—	—	—	—	79	—	—
ТК-21	64	—	—	—	—	84	—	—
СНЦ	55	—	—	—	—	—	—	—
ЛФ-11	83	89	93	98	101	103	106	109
КВФ-4	80 ± 5	—	—	—	—	—	—	100 ± 5 (20—1000 °С)
17	83	84	87	89	91	93	96	97
Фарфор	—	—	—	—	—	—	40—60	—
Металлы и сплавы								
Ковар	48	46	45	63	78	90	99	110
Н-42	52	53	63	81	95	—	—	—
Н-46	78	77	77	89	102	111	120	129
Медь	172	177	180	182	186	190	193	197
Армко железо	123	126	130	134	136	138	135	—
Сталь 03Х18Н12ВИ	—	171	174	180	183	186	196	199

Продолжение табл. 10

Материал	Значения $\alpha \cdot 10^7$ в интервале температур, °C							
	20—200	20—300	20—400	20—500	20—600	20—700	20—800	20—900
Вольфрам	43	45	43	43	45	48	50	55 (20—1100 °C)
Молибден	49	53	54	55	57	60	63	73 (20—1100 °C)
Тантал	64	65	65	66	68	71	73	81 (20—1100 °C)
Ниобий	72	73	74	75	76	77	77	81 (20—1100 °C)
МД15 Н. П (Ni 2,8—2,0; Cu 14— 15, Mo—остальное)	—	—	—	—	75	—	78	80 (20—1000 °C)
МД32НП (Ni 2,8; Cu 29,8; Mo — ос- тальное)	—	—	—	—	105	—	113	120 (20—1000 °C)
ЦНТ-3	63	—	70	—	74	—	78	79
МР-47ВП (Re 47 ± 3; Mo — остальное)	—	—	66	66	67	—	—	—
ВР-27ВП (W73; Re— остальное)	—	—	—	—	—	—	—	55
Цирконий	54	—	69	—	—	89	—	—
Титан	88	92	95	97	99	99	100	—

В табл. 8 свойства керамических материалов даны для расчетного химического состава, принятых для данного материала оптимальных условий производства и стандартизованных методов измерения. В то же время различные примеси, пористость, микроструктура, условия определения свойств, колебания температуры и времени при изготовлении деталей, а также форма и размер детали могут оказывать существенное влияние на параметры изделий. В настоящее время неизвестны общие закономерности для определения влияния перечисленных факторов на свойства керамики. При выборе материалов целесообразно руководствоваться некоторыми правилами [9, 10, 11].

1. Прочность керамических материалов при растяжении зависит от пористости и размера зерен. Влияние пористости определяется выражением

$$\sigma_B = \sigma'_B e^{-AP}, \tag{1}$$

где σ_B — прочность при растяжении; σ'_B — прочность при растяжении образца с нулевой пористостью; A — постоянный коэффициент, равный $\sim 4\text{--}7$; P — объем пор в образце.

2. Влияние размера зерен на прочность при растяжении описывается следующим образом:

$$\sigma_B = \sigma_1 + \theta d^{-0,5}, \tag{2}$$

где σ_1 и θ — константы; d — средний размер зерен.

Для образцов из чистой окиси алюминия при комнатной температуре σ_H (кгс/см²) в зависимости от размеров кристаллов можно рассчитать по формуле

$$\sigma_H = 6045d^{-0,33}, \tag{3}$$

где d — средний размер кристаллов, мкм.

Таким образом, с увеличением средних размеров зерен прочность керамических материалов при растяжении и изгибе уменьшается.

3. Модуль упругости в зависимости от пористости материала изменяется следующим образом:

$$E = E_0 (1 - 1,9P + 0,9P^2), \tag{4}$$

где E — модуль упругости; E_0 — модуль упругости образца с нулевой пористостью; P — объем пор в образце.

4. Коэффициент Пуассона для всех керамических материалов находится в пределах 0,20—0,35. В случае отсутствия конкретных данных его целесообразно принимать равным 0,25.

5. Коэффициенты Пуассона для окислов мало отличаются друг от друга, поэтому модуль упругости двухфазных керамических материалов можно рассчитать по выражению

$$E = E_1 V_1 + E_2 V_2, \quad (5)$$

где V_1 и V_2 — относительная объемная доля обеих фаз; E_1 и E_2 — модули упругости первой и второй фазы.

6. Изменение теплопроводности керамических материалов в зависимости от пористости характеризуется выражением

$$\lambda = \lambda_0 (1 - P), \quad (6)$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности образца с нулевой пористостью; P — объем пор в образце.

7. Температурный коэффициент линейного расширения многофазного керамического материала определяют исходя из выражения

$$\alpha = \frac{\alpha_1 E_1 \gamma_1 / \rho_1 + \alpha_2 E_2 \gamma_2 / \rho_2 + \dots}{E_1 \gamma_1 / \rho_1 + E_2 \gamma_2 / \rho_2 + \dots}, \quad (7)$$

где E_1, E_2 — модули упругости отдельных фаз; γ_1, γ_2 — относительные массовые концентрации фаз; ρ_1, ρ_2 — плотность фаз.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При расчете элементов соединения, обработке результатов наблюдений и контроле качества узлов необходимо использовать средние значения $\bar{X}$, среднеквадратичное отклонение σ , стандартизованную величину Z с нулевым средним и единичным среднеквадратичным отклонением, среднеквадратичную ошибку среднего значения σ_0 , коэффициент вариаций V и критерий Стьюдента t .

В том случае, когда речь идет о прочности, термостойкости и других параметрах металлокерамических соединений, следует иметь в виду, что при этом подразумеваются средние значения рассматриваемых величин, которые получены из индивидуальных значений, и чем их больше, тем с большей вероятностью выборочное среднее приближается к математическому ожиданию генеральной совокупности рассматриваемого параметра. Для практических расчетов величина выборки должна быть в пределах 10—40 элементов.

Применяя основные закономерности, вытекающие из нормального распределения для термических и механических свойств металлокерамических узлов, можно рассчитывать элементы соединения с заданной надежностью, снизить трудоемкость испытаний, а также провести сплошной контроль качества узлов [6, 7].

Элементы соединения рассчитывают с заданной термической надежностью через стандартизованную случайную величину Z с нулевым средним и единичным среднеквадратичным отклонением:

$$Z = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma}; \quad (8)$$

при этом принимают, что $\bar{X} = f(D, \delta \dots)$, т. е. средняя термостойкость является функцией геометрии соединения, например, диаметра D , толщины манжеты δ и т. п. Среднеквадратичное отклонение с вероятностью 0,7—0,8 можно считать равным

$$\sigma = 0,25 \bar{X}. \quad (9)$$

Подставляя соответствующие обозначения для термостойкости соединений, имеем

$$Z = \frac{k_i - \bar{K}}{\sigma} = \frac{k_i - \bar{K}}{0,25 \bar{K}} \quad (10)$$

или

$$\bar{K} = f(D, \delta \dots) = \frac{4k_i}{Z + 4}, \quad (11)$$

где k_i и $\bar{K}$ — текущее и среднее значения термостойкости,

Число испытаний при определении $\bar{X}$ и σ можно сократить следующим образом.

Испытуемые узлы последовательно нагружают (механически или термически) на уровнях x_1 и x_2 и определяют число узлов, вышедших из строя, что дает возможность по таблицам определить Z_1 и Z_2 [18]. Дальнейший расчет сводится к решению равенства

$$\bar{X} = \frac{Z_2 x_1 + Z_1 x_2}{Z_2 - Z_1}; \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{x_1 - x_2}{Z_1 - Z_2}. \quad (13)$$

Сплошной (100%) контроль качества узлов осуществляют путем сравнения экспериментально-расчетных значений $\bar{X}$ и σ с заданными для данного узла. При этом целесообразно нагружать узлы на уровни, соответствующие выходу из строя 5 и 15% узлов, т. е. когда $Z_1 \approx -1,6$ и $Z_2 \approx -1,0$.

Большинство металлокерамических узлов имеет два и более соединений, поэтому возникает необходимость расчета надежности сложных конструкций, имеющих сое-

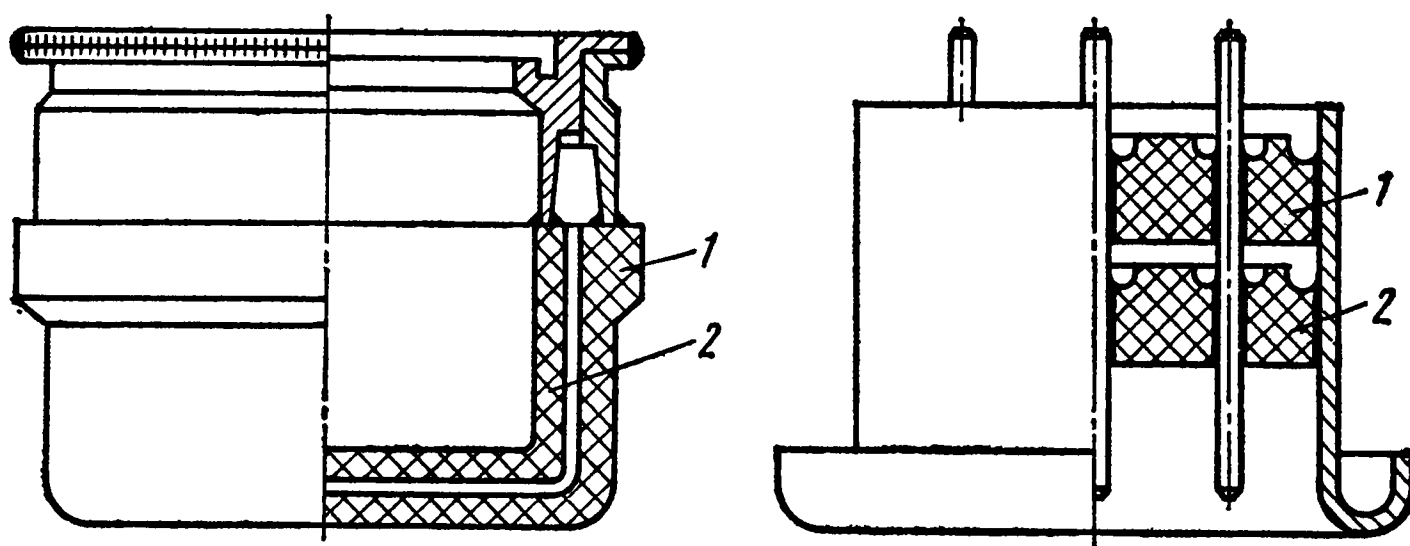


Рис. 12. Узлы с параллельным включением металлокерамических соединений в оболочку

динение с разной степенью надежности. Учитывая, что металлокерамические соединения в узле функционируют последовательно, т. е. натекание по любому из соединений приводит к разгерметизации узла, надежность металлокерамической конструкции рассчитывают по следующему выражению:

$$P = P_1^n P_2^q \dots P_i^s, \quad (14)$$

где P — надежность сложной конструкции; P_i — надежность отдельных соединений; n, q, s — число соединений в конструкции с надежностью P_1, P_2, P_i соответственно.

Если учесть, что сумма вероятностей полной группы несовместимых событий равна 1, то ненадежность конструкции

$$Q = 1 - (P_1^n P_2^q \dots P_i^s). \quad (15)$$

В том случае, когда в сложную конструкцию входит n металлокерамических соединений с одинаковой надежностью, два последних выражения можно соответственно представить в виде

$$P = P_1^n; \quad (16)$$

$$Q = 1 - P_1^n. \quad (17)$$

В большинстве случаев надежность конструкции повышают за счет рациональной конструкторской доработки, но иногда используют и пассивный способ увеличения надежности. На рис. 12 показаны металлокерамические узлы с параллельным резервированием. Натекание металлокерамических соединений 1 не приводит к разгерметизации узла в целом, так как продолжают функционировать соединения 2.

Надежность и ненадежность сложных металлокерамических узлов при «параллельном» включении соединений соответственно равны:

$$P = 1 - (Q_1^n Q_2^q \dots Q_i^s); \quad (18)$$

$$Q = Q_1^n Q_2^q \dots Q_i^s, \quad (19)$$

где Q_i — ненадежность отдельных соединений.

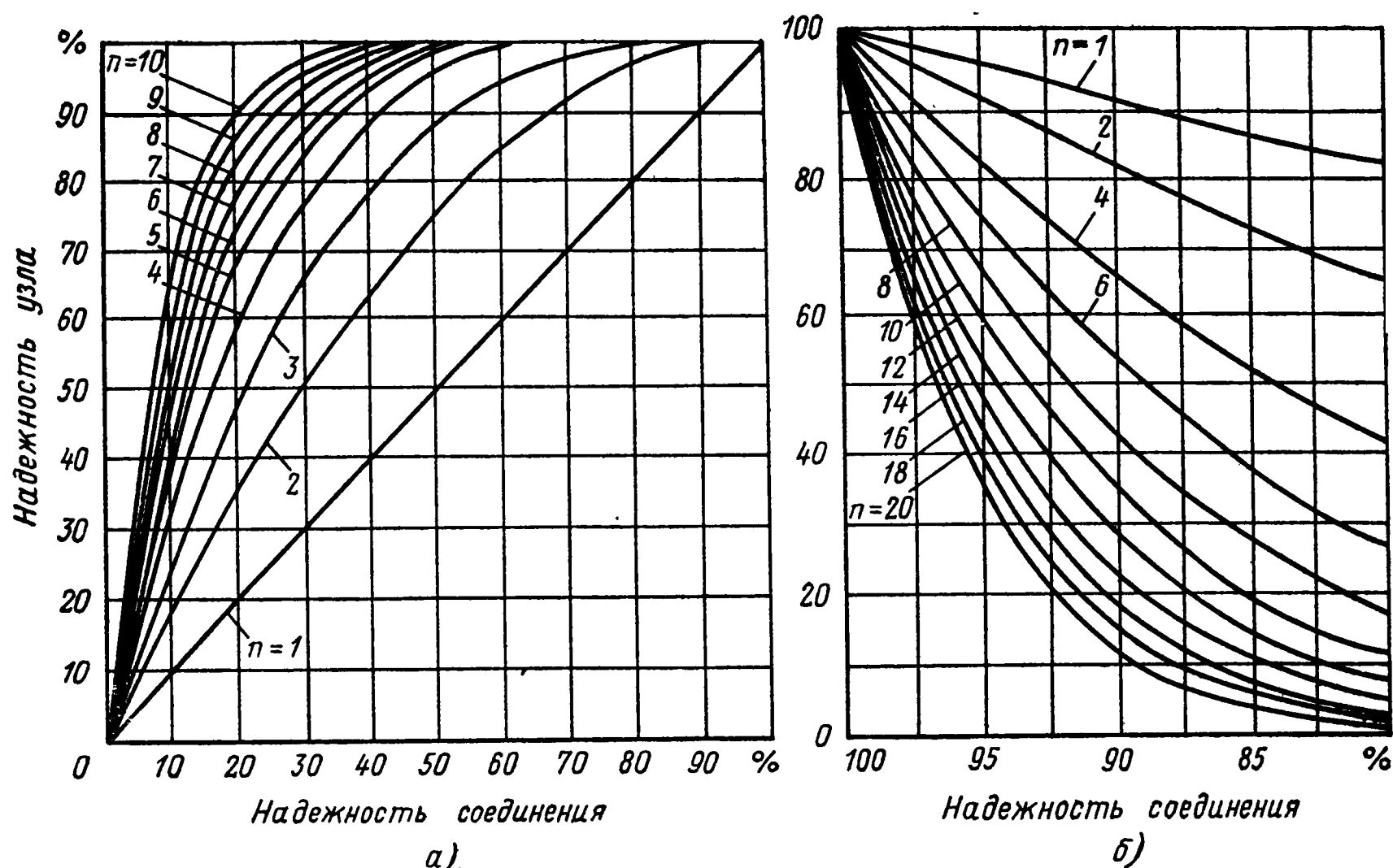
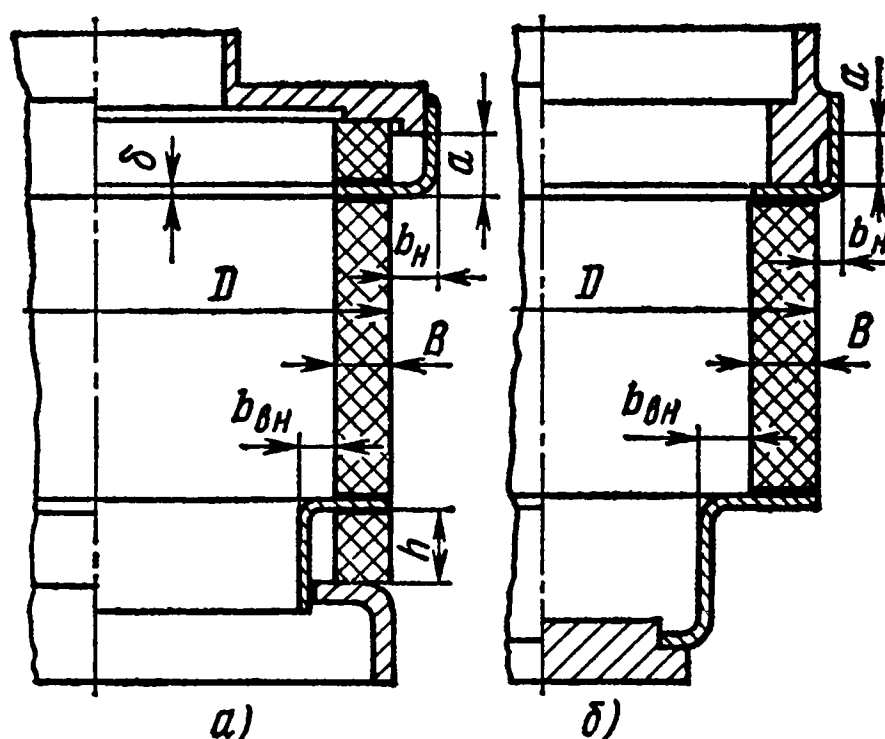


Рис. 13. Надежность металлокерамических узлов в зависимости от количества соединений и типа включения в оболочку:
а — параллельное; б — последовательное

На рис. 13 приведены данные для расчета надежности узлов с n соединениями при «последовательном» и «параллельном» включении соединений в оболочку.

Рис. 14. Торцовые металлокерамические соединения:

а — компенсированное; б — некомпенсированное (D — наружный диаметр керамического цилиндра; B — ширина зоны соединения; δ — толщина металла в зоне соединения; h — высота компенсаторного кольца; a — расстояние до массивных элементов узла; b_n — наружная выступающая часть манжеты; $b_{вн}$ — внутренняя выступающая часть манжеты)



Торцовые соединения являются более универсальными и надежными, чем цилиндрические и конусные. Торцовые соединения некоторых наиболее распространенных типов и принятые обозначения приведены на рис. 14.

Торцовые компенсированные соединения (рис. 14, а) более надежные, чем некомпенсированные. В данном конструктивном оформлении возможно сочетание с керамикой любого металла. Заданная при разработке узла термическая прочность определяется выбором конструктивных параметров соединения, которыми являются толщина металла в зоне шва, ширина шва, расстояние до массивных элементов узла, высота компенсаторного кольца, размеры наружного или внутреннего выступа. Из технологических и физико-технических параметров сочленяемых материалов следует учитывать температурные коэффициенты линейного расширения, модули упругости, предел текучести металла, температуру пайки, перепады температур при эксплуатации и изготовлении, а также стабильность технологических режимов.

При конструировании торцовых металлокерамических соединений следует иметь в виду, что чем более жестко соединен металл с керамикой, тем менее надежен шов, т. е. термические и механические свойства конструкции находятся в обратной пропорциональной зависимости.

Термостойкость соединений высокоглиноземистой керамики с металлами с достаточной для практики точностью может быть определена из следующего выражения:

$$\bar{K} = C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 \frac{D}{\delta^A}, \quad (20)$$

где C_1 — коэффициент, зависящий от материала манжет и типа соединения (компенсированное или некомпенсированное); C_2 — коэффициент прочности; C_3 — коэффициент ширины зоны шва; C_4 — коэффициент горизонтальной составляющей; C_5 — коэффициент вертикальной составляющей; A — показатель степени, учитывающий масштабный фактор и тип соединения.

Средняя термостойкость наиболее распространенных торцовых компенсированных соединений керамики 22-хс с медными манжетами может быть определена по следующей формуле:

$$\bar{K} = 1,72 C_2 C_3 C_4 C_5 \frac{D}{\delta^{[0,903 + 0,002(D - 25)]}}. \quad (21)$$

Коэффициент C_2 в выражении (21) зависит от прочности металлокерамических соединений при изгибе и равен

$$C_2 = 1 + \frac{\sigma_{\text{и}} - 1100}{5000}, \quad (22)$$

где $\sigma_{\text{и}}$ — механическая прочность соединения при изгибе, полученная на стандартных образцах диаметром 13 мм, кгс/см².

Когда прочность соединения неизвестна, для практических расчетов ее целесообразно принимать равной 1100 кгс/см², при этом $C_2 = 1$. Следует, однако, учитывать, что значение коэффициента C_2 , рассчитанное по последнему выражению, справедливо в интервале диаметров соединения от 10 до 120 мм.

Коэффициент ширины зоны шва C_3 следует определять по данным рис. 15; при оптимальной для каждого диаметра ширине зоны шва $C_3 = 1$ [5]. Оптимальная ширина зоны шва для соединений диаметром 10—100 мм может быть определена по данным рис. 15 при $C_3 = 1$, так, например, для соединений диаметром 50 мм оптимальная ширина шва равна 8 мм.

Коэффициент горизонтальной составляющей C_4 зависит от размеров выступающего за зону соединения участка манжеты и от ее толщины.

При наружном креплении манжеты к основанию термическая стойкость металлокерамических швов выше, чем при внутреннем креплении манжеты. В табл. 11 приведены значения коэффициента C_4 для диаметров соединения 25—150 мм.

При расчете элементов соединений, когда $1 \leq b \leq 5$, при толщине манжеты до 1—1,2 мм можно принимать $C_4 = 1$.

Учитывая технологию изготовления манжет штамповкой из листа, горизонтальную составляющую манжеты следует определять по выражению

$$b = 1 + 1,5\delta, \quad (23)$$

где δ — толщина манжеты.

Влияние вертикальной составляющей манжеты на среднюю термостойкость может быть практически устранено, если ее величину выбирать в соответствии с экспериментально полученной формулой

$$a \geq \frac{\alpha'}{\alpha} \sqrt{\delta D} \geq \theta \sqrt{\delta D}, \tag{24}$$

где α', α — температурные коэффициенты линейного расширения манжеты и основания в интервале температур затвердевания припоя и эксплуатации.

11. Значения коэффициента C_4 в зависимости от b и δ для компенсированных соединений

$b, \text{ мм}$	Внутренний выступ $b_{\text{вн}}$				Наружный выступ $b_{\text{н}}$			
	Коэффициент C_4 при толщине манжеты, мм							
	0,5	1,0	2,0	3,0	0,5	1,0	2,0	3,0
1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5,0	0,86	0,71	0,62	0,60	0,95	0,90	0,83	0,80
10,0	0,83	0,51	0,40	0,35	0,90	0,82	0,73	0,70
15,0	0,78	0,40	0,25	0,15	0,85	0,73	0,62	0,60
20,0	0,71	0,35	0,20	0,12	0,83	0,60	0,51	0,50

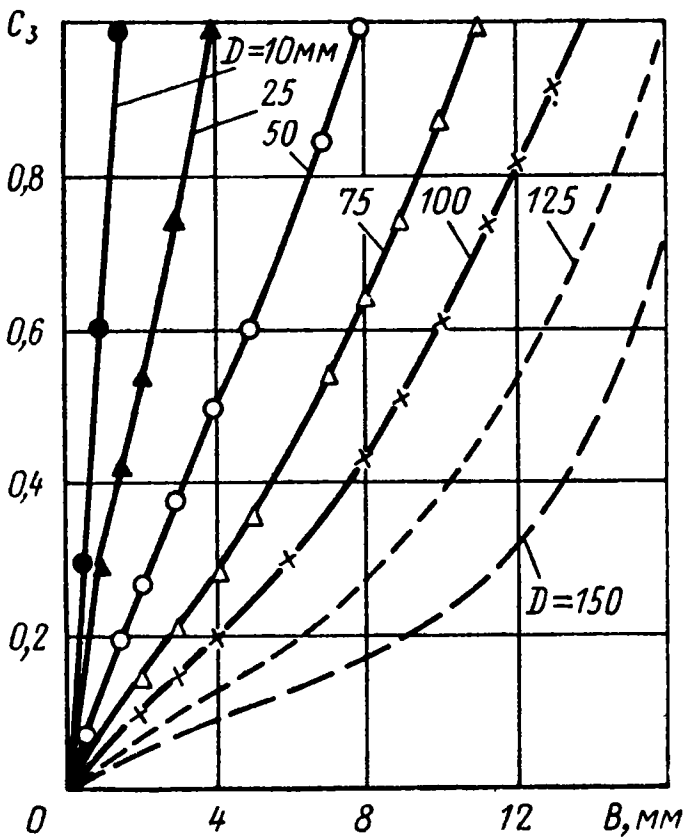


Рис. 15. Зависимость значения коэффициента C_3 от ширины зоны шва для медных манжет

При расчете a величина α' всегда должна иметь большее значение температурного коэффициента линейного расширения сопрягаемых металлов.

При разработке узлов вертикальную составляющую манжеты следует выбирать в соответствии с последним неравенством, тогда коэффициент $C_5 = 1$.

Для $a < \theta \sqrt{\delta D}$ значения C_5 пока не получены, однако следует учитывать, что термостойкость при этом уменьшается. На рис. 16 приведены данные для определения вертикальной составляющей в зависимости от диаметра соединения и толщины манжеты для наиболее распространенных материалов.

Высоту компенсаторного кольца следует рассчитывать по выражению, предложенному в работе [16],

$$h \approx 0,45 \sqrt{\frac{BD}{2}}. \tag{25}$$

На рис. 17 приведена зависимость для определения высоты компенсированного кольца, рассчитанного по этому выражению. Однако в большинстве случаев при проектировании гораздо выгоднее высоту компенсаторного кольца рассчитывать согласно выражению (24), так как при этом отпадает необходимость увеличивать размеры исходной заготовки для основания 1 узла (рис. 18, а) и согласовывать размеры a и h (рис. 18, б и в).

Таким образом, пользуясь приведенными соотношениями, можно рассчитать элементы соединения и определить среднюю термостойкость.

Торцовые некомпенсированные соединения имеют гораздо больше ограничений при конструктивном оформлении, чем компенсированные. Минимальные ограничения по конструкции присущи металлокерамическим соединениям, выполненным с использованием арматуры из псевдосплавов (медь — никель — молибден, медь — молибден, медь — никель — вольфрам), имеющих такой

же температурный коэффициент линейного расширения, как и у керамического материала, например МД15НП в паре с керамикой 22-хс и М7. Высокоглиноземистые керамические детали можно соединять с металлическими деталями из указанных

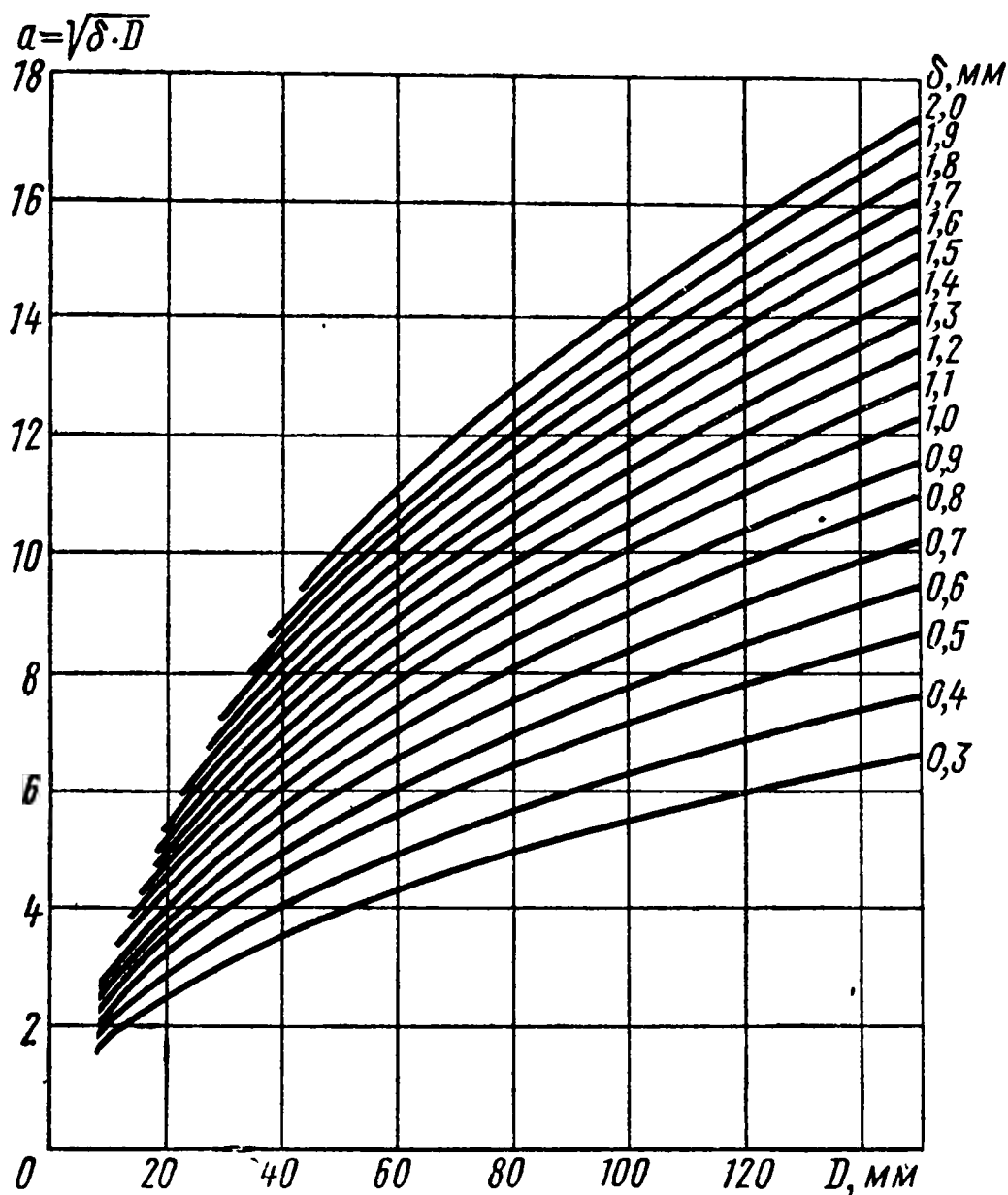


Рис. 16. График для определения значений a в зависимости от толщины манжеты и диаметра соединения

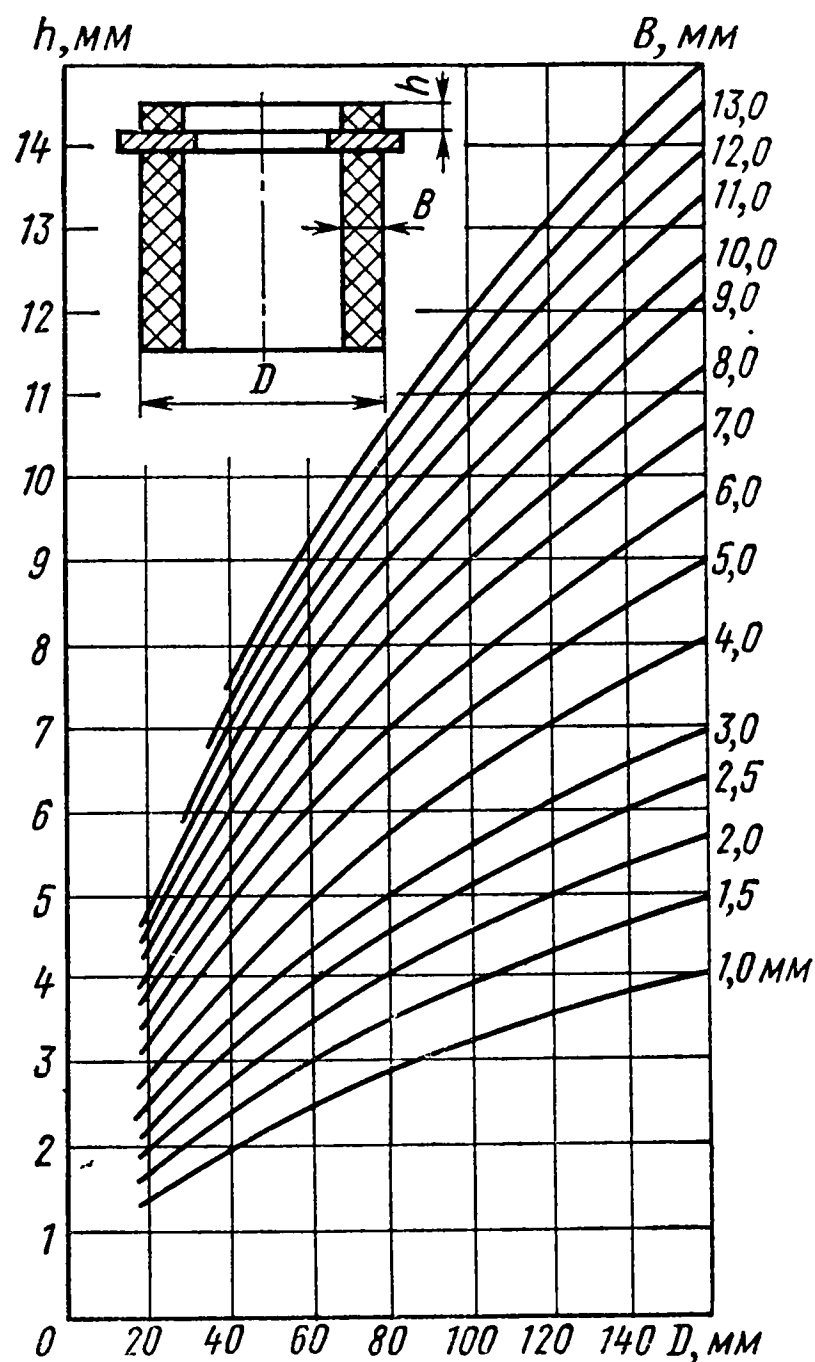


Рис. 17. График для определения значений h в зависимости от ширины шва и диаметра соединения

сплавов практически в любом конструктивном оформлении. При этом отпадает необходимость в тонких переходных элементах, аксиальной симметрии соединения и ограничениях по габаритам соединения. Однако следует учитывать возможные градиенты температуры между металлом и керамикой, которые могут сопровождаться возникновением предельных напряжений в соединении.

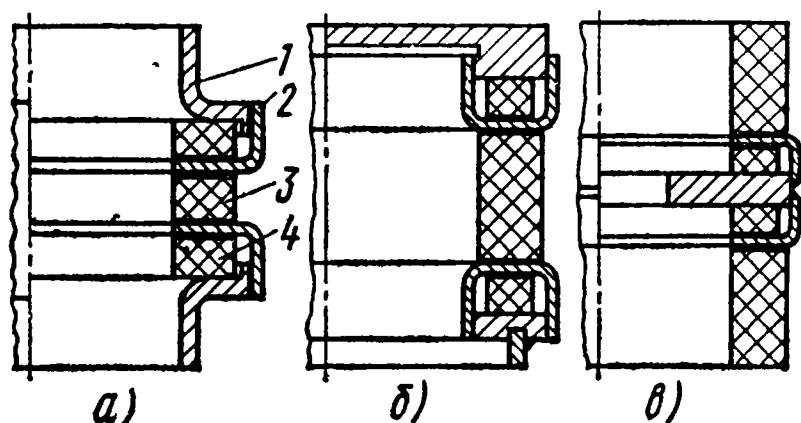


Рис. 18. Металлокерамические узлы с торцовыми компенсированными соединениями: 1 — основание; 2 — манжета; 3 — изолятор; 4 — компенсатор

Хорошие некомпенсированные соединения получают, применяя ковар и железоникелевые манжеты при пайке, припоями с температурой плавления до 800° С. Торцовые некомпенсированные соединения коvara с алюмооксидной керамикой при диаметрах соединения до 100 мм и толщине манжеты 0,3—0,8 мм обладают удовлетворительной термостойкостью и механической прочностью. Однако при этом следует учитывать общие принципы конструирования металлокерамических соединений.

Менее надежными являются некомпенсированные соединения с металлами, имеющими высокий коэффициент линейного расширения. Несмотря на то, что торцовые соединения можно получать при любых сочетаниях металл — керамика, в практике конструирования приходится ограничиваться сравнительно узким кругом металлов,

пригодных для соединения с керамикой. При этом общим принципом является следующее: чем выше предел текучести металла, тем тоньше должна быть манжета, соединяемая с керамикой. В соединениях с керамикой 22-хс, М7, сапфирит наиболее широко применяют медь Моб.

Термостойкость некомпенсированных соединений меди с алюмооксидной керамикой определяется по формуле

$$\bar{K}=0,25C_3C_4C_5D\delta^{-1,7},$$

(26)

[обозначения см. формулу (20)]. При этом выражение (26) справедливо для среднестатистической прочности керамики, равной 3100 кгс/см², а с ее увеличением до 3700 кгс/см² коэффициент 0,25 возрастает до 0,4, а показатель степени при δ до — 1,578.

Как и для компенсированных соединений, значения коэффициента C₃ принимают по рис. 15.

Коэффициент C₃ равен единице при соблюдении неравенства (24), при этом вертикальную составляющую манжеты следует выбирать исходя из данных рис. 16.

Значения коэффициента C₄ в зависимости от величины горизонтальной составляющей манжеты, ее толщины и места расположения по отношению к соединению приведены в табл. 12.

12. Значения коэффициента C₄ в зависимости от b и δ для некомпенсированных соединений

Положение выступа относительно соединения	b, мм	Значения C ₄ при толщине манжеты, мм				Положение выступа относительно соединения	b, мм	Значения C ₄ при толщине манжеты, мм			
		0,5	1,0	2,0	3,0			0,5	1,0	2,0	3,0
Внутреннее	1	1,00	1,00	1,00	1,00	Наружное	1	1,00	1,00	1,00	1,00
	5	0,95	0,80	0,70	0,67		5	0,95	0,89	0,83	0,80
	10	0,90	0,47	0,31	0,30		10	0,90	0,78	0,70	0,67
	15	0,85	0,40	0,25	0,20		15	0,85	0,63	0,52	0,48
	20	0,83	0,31	0,16	0,12		20	0,83	0,41	0,32	0,27

Основные элементы торцовых некомпенсированных соединений керамики с медными манжетами ориентировочно можно выбирать по данным рис. 19 и 20.

Торцовые компенсированные соединения с манжетой «слойка». Практически единственным недостатком металлокерамических торцовых соединений является их сравнительно низкая механическая прочность, так как толщина манжеты в зоне соединения обычно бывает небольшой и, кроме того, на манжету действует несимметричная относительно соединения нагрузка. В то же время к механической прочности и виброустойчивости металлокерамических конструкций предъявляют все возрастающие требования. Повышение их механической прочности путем увеличения толщины манжеты приводит к значительному снижению термостойкости.

В электровакуумных приборах, как уже отмечалось выше, широко используют металлокерамические узлы с медными манжетами, обеспечивающими хорошую термостойкость соединений благодаря повышенным пластическим свойствам меди.

Для реализации положительных свойств меди и повышения механической и термической стойкости металлокерамических соединений целесообразно использовать конструкции узлов с комбинированными манжетами «слойка», например, медь — ковар — медь, медь — молибден — медь (рис. 21). Температурный коэффициент линейного расширения подобной спаянной манжеты снижается, а ввиду того, что медь в шве прилегает к керамике, полностью реализуются пластические свойства меди. Благодаря такому сочетанию материалов можно повысить толщину металлической конструкции в зоне шва не снижая термостойкость узла.

На рис. 22 и 23 приведены данные по термической и механической прочности металлокерамических соединений с медными манжетами и манжетой «слойка». Пайка узлов осуществлялась припоем ПСр 72, толщина коваровой прокладки 0,3 мм. Как

видно на рис. 22, термостойкость узлов с манжетой «слойка» при ее толщине в зоне шва до 2 мм почти в 2 раза выше, чем узлов с медными манжетами. Узлы с медной манжетой толщиной 1,2 мм, имеющие такую же термостойкость, как и узлы с манжетой

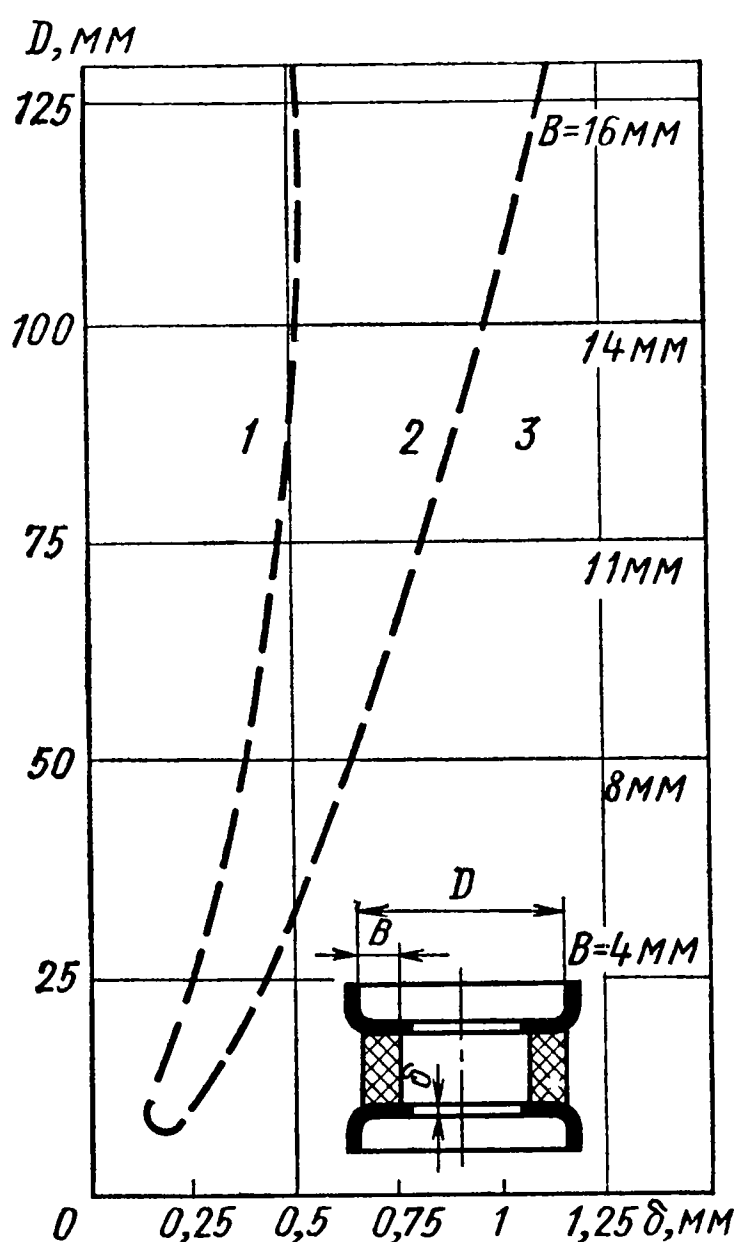


Рис. 19. Размеры торцовых некомпенсированных соединений при оптимальной ширине шва:

1 — изготовление узлов затруднено; 2 — рекомендуемые размеры; 3 — размеры узлов с низкой термостойкостью

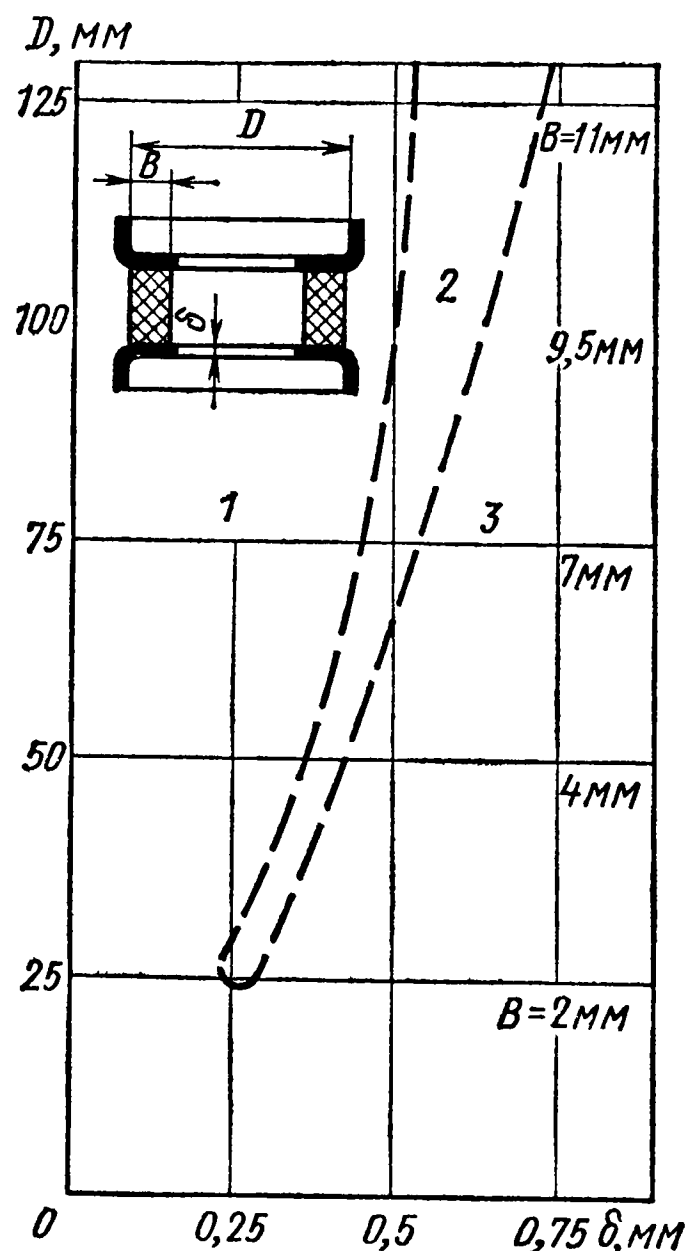


Рис. 20. Размеры торцовых некомпенсированных соединений при ширине шва, равной 50% оптимальной (обозначения см. на рис. 19)

«слойка» толщиной 2,3 мм, деформируются гораздо больше (рис. 23). Деформация 0,1 мм, условно принимаемая за предельно допустимую, наблюдается в узлах с медной манжетой при нагрузках 200—300 кгс, в то время как в узлах с манжетой «слойка» такая деформация наблюдается при нагрузках в 2,5—3 раза больших.

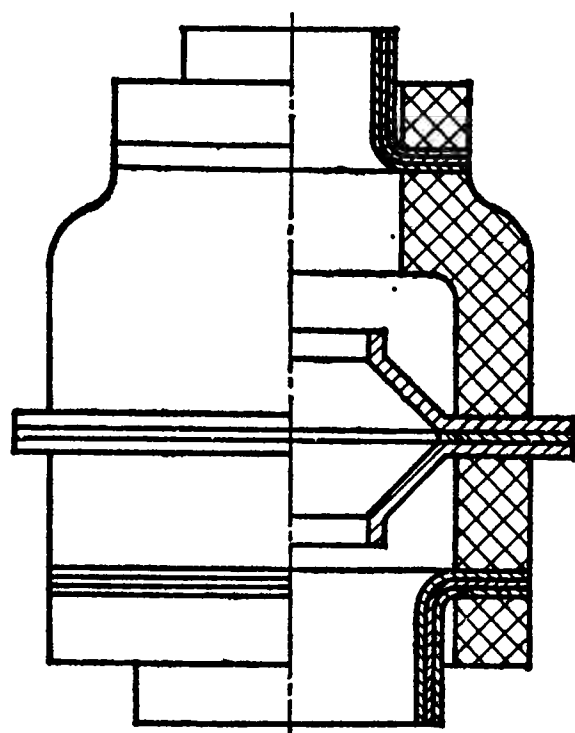


Рис. 21. Металлокерамический узел с манжетой «слойка»

Разрыв металлокерамических узлов с медной манжетой происходит по манжете вне зоны соединения при нагрузках порядка 600—700 кгс (манжета 0,6 мм) и 1200—1300 кгс (манжета 1,2 мм). Узлы с манжетами «слойка» разрушаются в основном по керамике изолятора и частично по шву при нагрузках 2300—2400 кгс.

Таким образом, при одинаковой термостойкости механическая прочность узлов с манжетами «слойка» в 2—2,5 раза больше.

С увеличением толщины манжеты «слойка» механическая прочность узлов повышается (рис. 23). При этом термостойкость остается высокой (рис. 22).

Торцовые лезвенные (ножевые, рантовые) соединения керамики с металлами (рис. 24) позволяют получать простые по исполнению металлокерамические узлы. При этом

нет необходимости изготавливать арматуру, спаиваемую с керамикой, применять переходные тонкие элементы от массивных деталей узла к керамике, а лишь требуется соответствующая заточка их в месте соединения с керамикой. Особенно ценным является возможность изготовления соединений произвольной геометрической формы, например, овальной, прямоугольной и т. п.

В табл. 13 в соответствии с обозначениями, принятыми на рис. 24, приведены рекомендуемые размеры соединений меди и ковара с керамикой 22-хс.

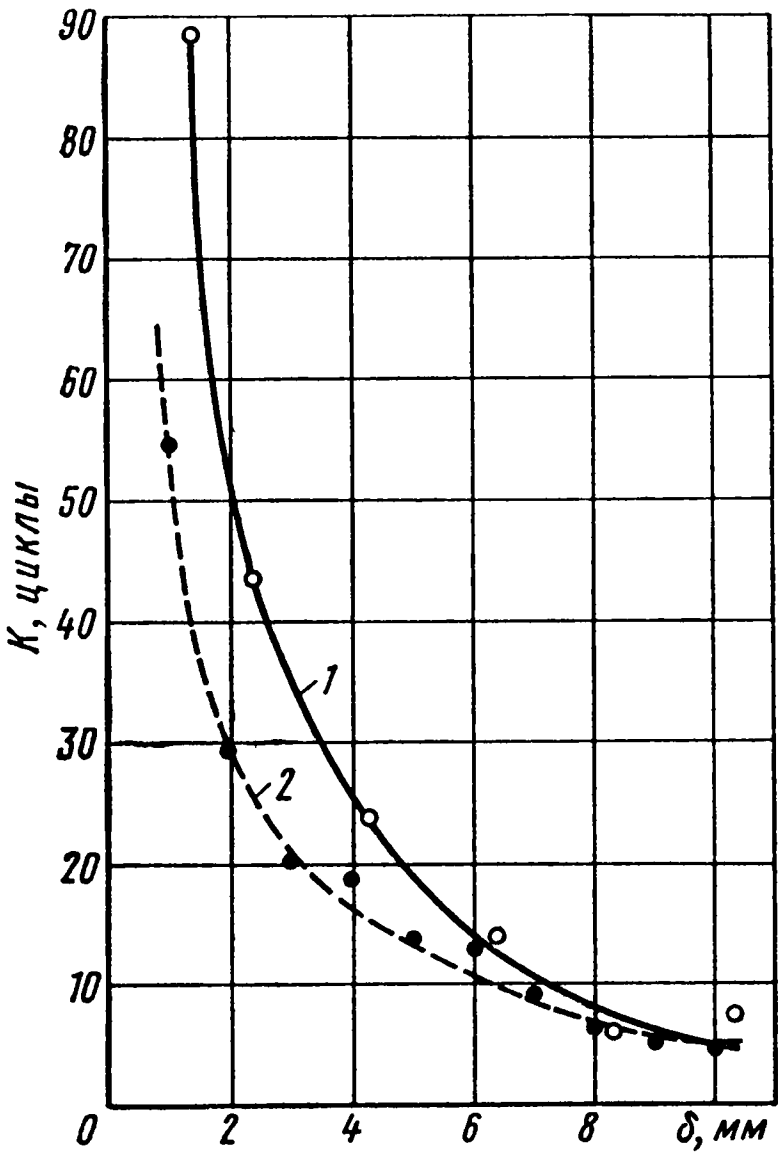


Рис. 22. Влияние толщины манжеты на среднюю термостойкость металлокерамических соединений:
1 — «слойка»; 2 — медь

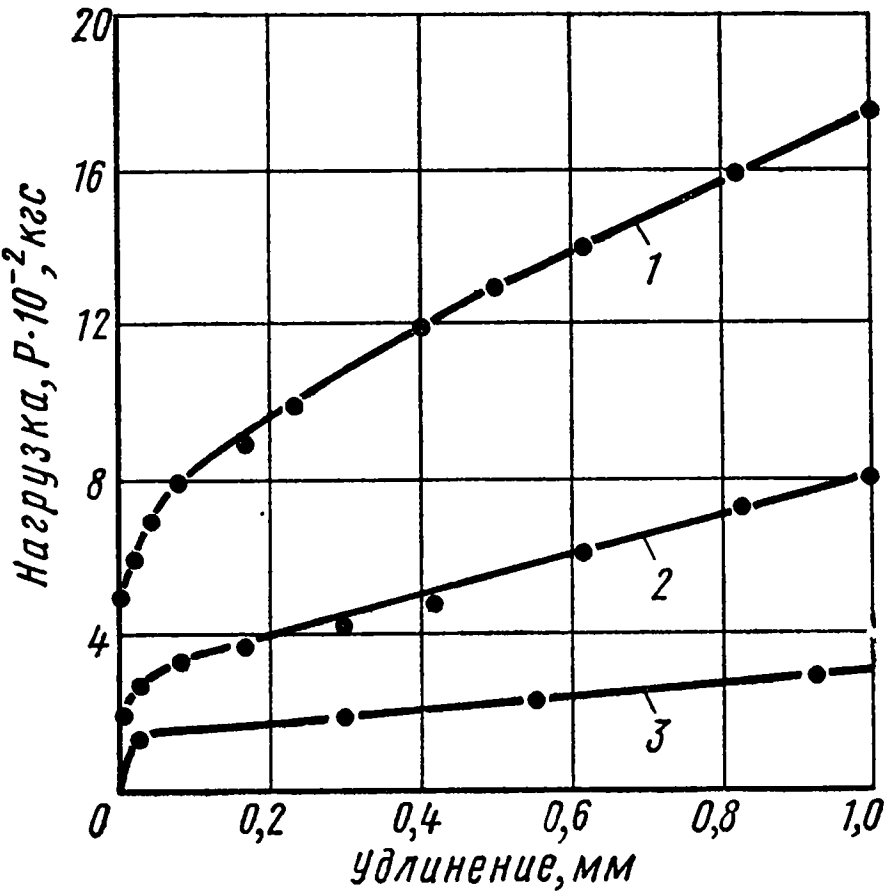


Рис. 23. Зависимость удлинения металлокерамических узлов от прилагаемой нагрузки и типа манжеты:
1 — «слойка» 2,3 мм; 2 — медь 1,2 мм; 3 — медь 0,6 мм

Металлокерамические узлы, выполненные по данным табл. 13, имеют термостойкость в режиме 20—600—20° С в пределах 15—25 циклов. Ввиду симметричного распределения напряжений механическая прочность узлов с лезвенным соединением значительная, так, например, узел с диаметром соединения 50 мм при $S = 0,7$ мм в случае коваровой манжеты разрушается при нагрузках 1200—1800 кгс, а с медной манжетой — при 900—1300 кгс.

13. Рекомендуемые размеры лезвенных металлокерамических соединений

Параметры	Диаметр, мм	Материал манжет	
		Медь	Ковар
S , мм	10—25	0,3—0,5	0,5—0,7
α°		0—5	0—5
B , мм		3	4
a , мм		2,5—3,5	3,5—4,5
S , мм	30—80	0,5—1,2	0,7—1,5
α°		5—7	0—5
B , мм		4,0—8,5	5,0—10,0
a , мм		5—10	5—12

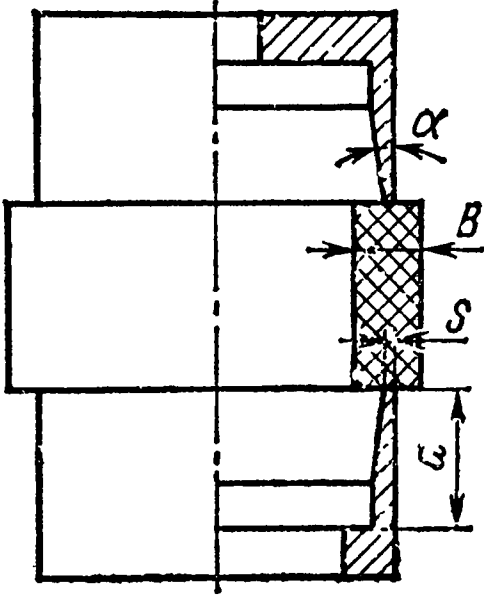


Рис. 24. Металлокерамический узел с лезвенным соединением (S — ширина лезвия; α — угол заточки; B — толщина стенки керамического цилиндра; a — расстояние от соединения до массивного элемента узла)

Цилиндрические (телескопические) соединения керамики с металлами бывают двух видов: охватывающие, когда металлическая деталь охватывает керамическую деталь, и внутренние, когда металлическая деталь находится внутри керамической. В большинстве случаев от относительного расположения металла и керамики в соединении зависит напряженное состояние конструкции. Охватывающие соединения позволяют использовать высокие прочностные свойства керамических деталей на сжатие, так как α большинства металлов больше, чем керамики. В конструкциях с внутренним соединением керамическая деталь находится в растянутом состоянии и работает на растяжение. В этом случае предел прочности на порядок ниже, чем при сжатии. Поэтому внутренние соединения возможны либо при полном совпадении температурных коэффициентов линейного расширения сопрягаемых материалов, либо при таком конструктивном оформлении, когда снижается давление металлической детали

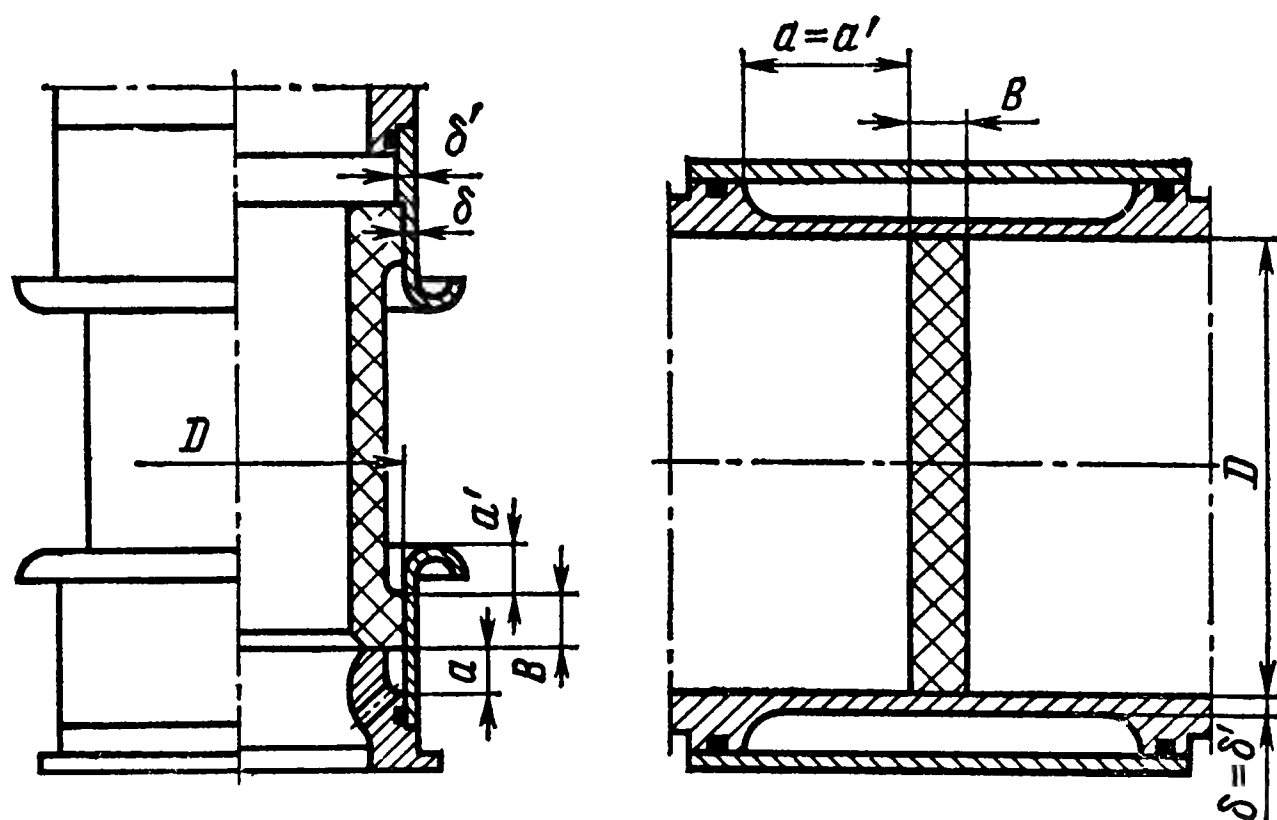


Рис. 25. Основные конструктивные элементы охватывающих металлокерамических соединений

на внутреннюю поверхность керамики. Наиболее эффективной мерой является резкое уменьшение толщины манжеты, припаяемой к керамике (до 0,1—0,3 мм). При этом достигается эффект только в том случае, когда манжета в ходе температурных циклов следует за керамикой, а напряжения, возникающие в соединении, не превышают прочность сцепления металлизационного слоя с керамикой.

Охватывающие соединения применяют при диаметрах соединения металла с керамикой до 50—60 мм. Наиболее широкое распространение получили соединения высокоглиноземистой керамики с манжетами из ковара, фени и в меньшей мере соединения с медью, никелем, низкоуглеродистой сталью. Металлы с большими значениями α применяют в соединениях с керамикой диаметром 8—10 мм. Для получения надежного высокотемпературного соединения при больших диаметрах следует применять съемные или несъемные бандажки из металлов с низким α , например, из молибдена.

Надежность охватывающих соединений зависит от следующих конструктивных элементов: ширины зоны шва B , толщины манжеты в зоне шва δ и в области, прилегающей к шву δ' , расстояния от шва до массивных элементов узла a , наружного диаметра шва D и размеров выступающего участка манжеты a' (рис. 25).

Термостойкость охватывающих соединений в большой мере определяется значениями E и δ , поэтому толщина коваровых манжет не должна превышать 0,5—0,8 мм, стальных 0,3—0,4 мм, а медных 0,4—1,0 мм.

Исследования показывают, что уже на стадии разработки узла можно рассчитать его термостойкость, если известны конструктивные элементы и термостойкость соединения аналога.

Термостойкость охватывающих соединений равна:

$$\bar{K} = \frac{(\lg B - \lg B_{k=0}) Te}{\delta}, \quad (27)$$

где Te — коэффициент термического подобия; B — ширина зоны шва, мм; $B_{k=0}$ — ширина зоны шва, при которой средняя термостойкость равна нулю, мм; δ — толщина манжеты, мм.

Для керамических деталей из материала 22-хс, пайка которых производится медным припоем при испытании в режиме 20—800—20° С, коэффициент термического подобия для коваровых и железо-никелевых манжет из сплава Н-46 соответственно равен $11 \pm 1,5$ и $16 \pm 2,0$. Для узлов с коваровыми манжетами, паянными припоем ПСр 72 и испытанными в режиме 20—600—20° С, он равен 180 ± 30 . Значения Te для других металлов можно получить при испытаниях узлов.

В том случае, когда манжета за зоной шва имеет бóльшую толщину, в предыдущее выражение вместо δ следует подставлять приведенную толщину манжеты

$$\Delta = \frac{\delta + \delta'}{2}. \quad (28)$$

При этом толщина манжеты за зоной шва и приведенная толщина манжеты не должны выходить за пределы следующих неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \delta &\leq \delta' < 2\delta; \\ \Delta &\leq 2,0 \text{ мм.} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Для коваровых манжет $B_{k=0}$ следует принимать в зависимости от диаметра соединения согласно данным рис. 26.

Как и для торцовых соединений, расстояние a определяют по неравенству (24). Величину a' выбирают в зависимости от толщины манжеты в зоне соединения и наружного диаметра [6]:

$$a' \geq (0,4 \div 0,6) \sqrt{\frac{\delta \cdot D}{2}}. \quad (30)$$

Если в выражении (30) коэффициент перед корнем принять равным 0,5 и провести преобразование, то получим

$$a' \geq 0,35 \sqrt{\delta D}. \quad (31)$$

Неравенство (31) аналогично выражению (24), что позволяет для выбора a' использовать данные рис. 16.

Так как $B_{k=0}$ и δ (или Δ) взаимозависимые величины, то Δ или δ можно рассчитать по выражению (27) лишь методом последовательного приближения. Расчет значительно облегчается при использовании данных рис. 27, на котором приведена зависимость $\bar{K}$ от Δ (или δ) при различных значениях B . Так как указанная взаимосвязь существует для различных Te , на рис. 27 приведены данные для наиболее распространенных манжет из ковара, т. е. при $Te = 11$. Для расчетов при других значениях Te необходимо предварительно определить коэффициент эквивалентности

$$Y_{800} = \frac{Te_k}{Te} = \frac{\bar{K}_{800}}{\bar{K}}, \quad (32)$$

где Y_{800} — коэффициент эквивалентности в режиме 20—800—20° С; Te_k — коэффициент термического подобия для ковара при испытании в режиме 20—800—20° С;

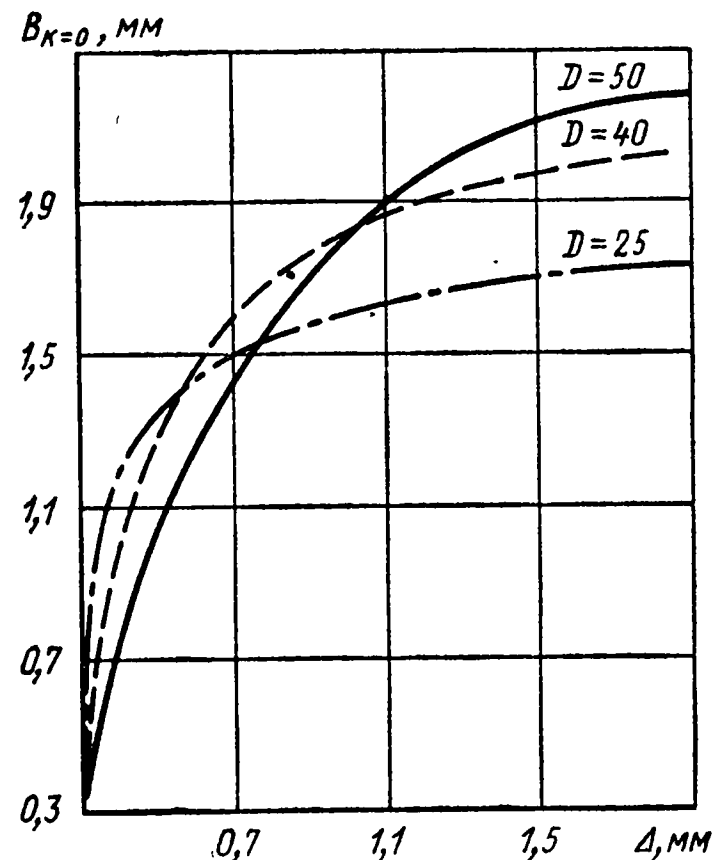


Рис. 26. Зависимость значений $B_{k=0}$ от диаметра соединения и толщины манжеты

Te — коэффициент термического подобия для рассчитываемого соединения; $\bar{K}_{800}$ — средняя термостойкость в режиме 20—800—20° С; $\bar{K}$ — средняя термостойкость в любом температурном режиме.

Так, например, требуется определить δ для узла с манжетами из сплава Н-46. Узел должен иметь среднюю термостойкость $K = 20$ циклов в режиме 20—800—20° С, $B = 6$ мм.

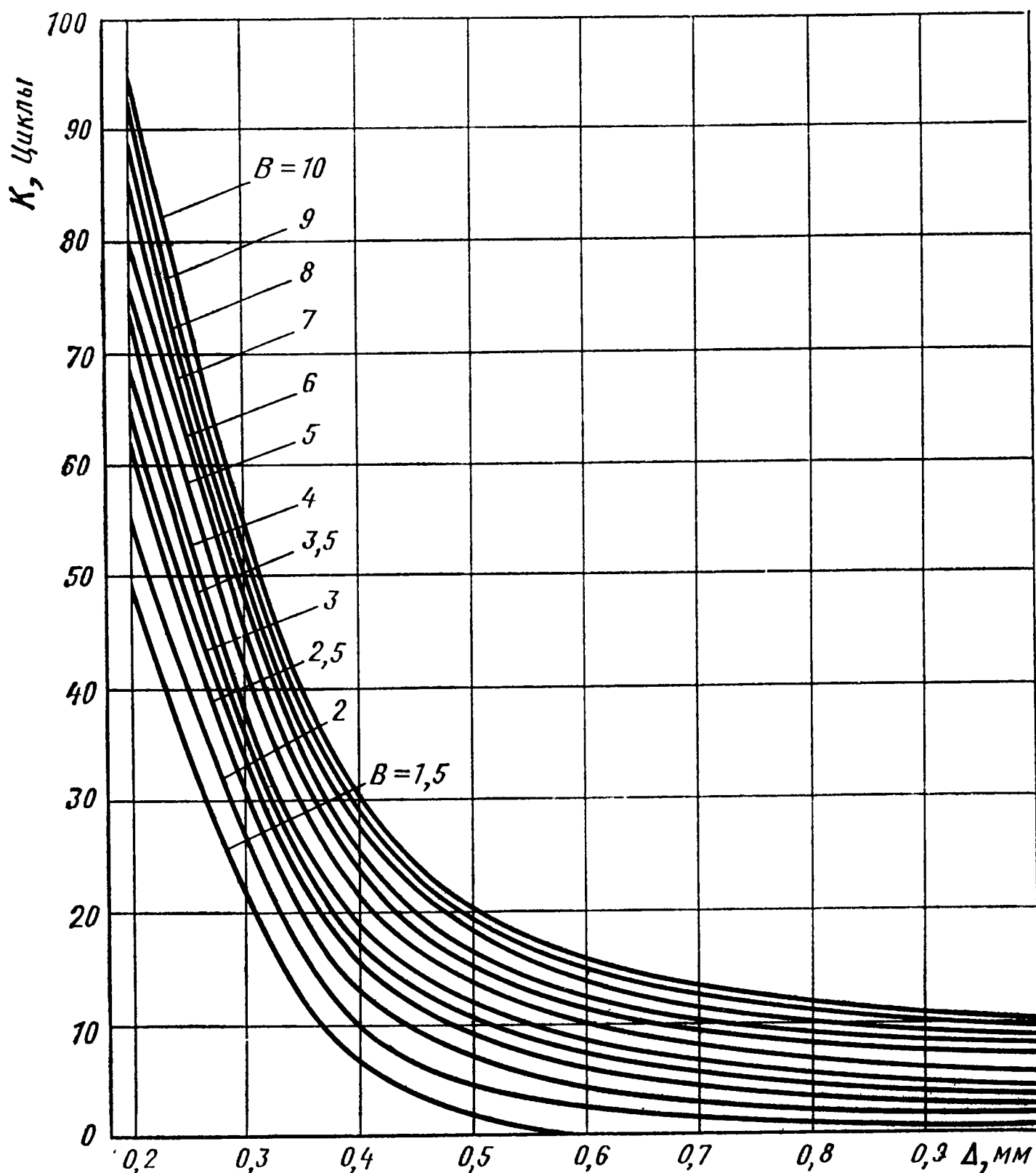


Рис. 27. График для определения толщины манжеты в зависимости от термостойкости узла и ширины зоны соединения для $Te = 11$

Для манжет из сплава Н-46 ($Te = 16$) по формуле (32) имеем

$$Y_{800} = \frac{11}{16} = 0,69.$$

Согласно формуле (32) термостойкость соединения с коваровыми манжетами в режиме 20—800—20° С

$$\bar{K}_{800} = Y_{800} \bar{K} = 0,69 \cdot 20 = 13,8 \text{ цикла.}$$

По данным рис. 27 толщина манжеты при $B = 6$ мм равна 0,53 мм.

Металлокерамические соединения можно эксплуатировать в различных температурных режимах. В табл. 14 приведены коэффициенты эквивалентности для коваро-

вых манжет в зависимости от режима испытания. Эти значения получены для керамики 22-хс при пайке медью; толщина манжет 0,8 мм, ширина зоны соединения 6 мм.

Например, требуется определить толщину манжеты из ковара для узла, который будет эксплуатироваться в режиме 20—550—20° С и должен иметь при этом среднюю термостойкость не ниже 200 циклов, а ширина зоны соединения $B = 4$ мм. По табл. 14 и выражению (32) имеем

$$\bar{K}_{800} = Y_{800} \bar{K} = 0,040 \cdot 200 = 8 \text{ циклов.}$$

По рис. 27 определяем толщину манжеты 0,62 мм. В случае, когда необходимо получить охватывающее соединение, например, меди с металлами, имеющими температурный коэффициент линейного расширения больший, чем у керамики, при пайке необходимо использовать бандаж из материала с α , близким к α керамики.

14. Значения коэффициента Y_{800} в зависимости от режима термоциклирования

Режим испытания, °С	Y	Режим испытания, °С	Y
20—800—20	1,000	20—550—20	0,040
20—750—20	0,285	20—500—20	0,027
20—700—20	0,154	20—450—20	0,019
20—650—20	0,091	20—400—20	0,013
20—600—20	0,057		

15. Термомеханические свойства металлокерамических соединений с коаксиально расчлененной манжетой

Диаметр соединения, мм	Средняя термостойкость, циклы	Прочность при растяжении, кгс
13	43	960
25	95	1260
50	72	1960
75	107	4250

К недостаткам охватывающих соединений с медными манжетами следует отнести сравнительно небольшую прочность узлов в осевом направлении. Это относится и к другим материалам, так как повышение прочности за счет увеличения толщины

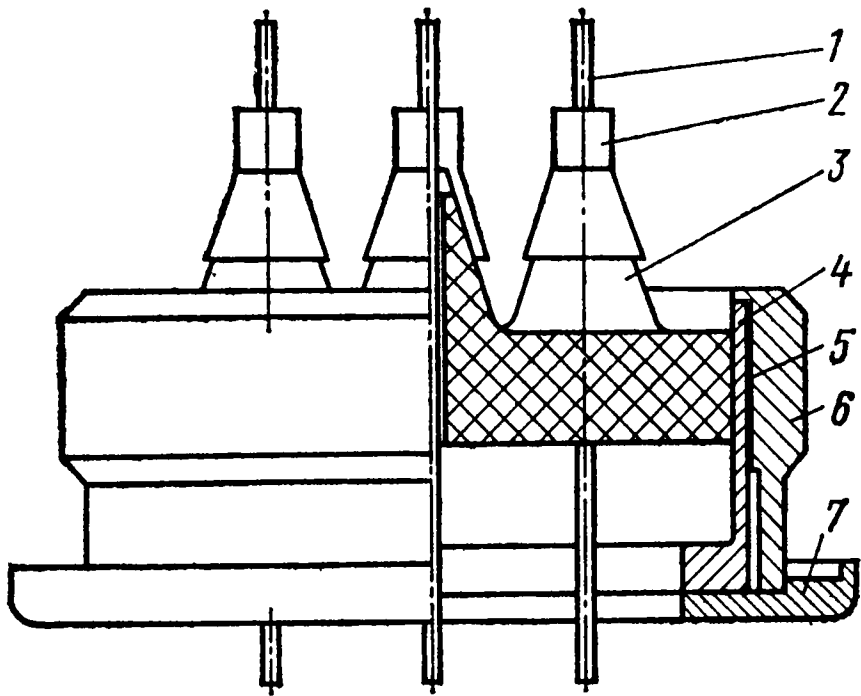


Рис. 28. Семиштырьковая металлокерамическая ножка с коаксиально расчлененной манжетой в охватывающем соединении:

1 — токовводы; 2 — конусный колпачок; 3 — керамическое основание; 4 — тонкая внутренняя медная манжета; 5 — окись хрома; 6 — толстая наружная коваровая манжета; 7 — металлический фланец

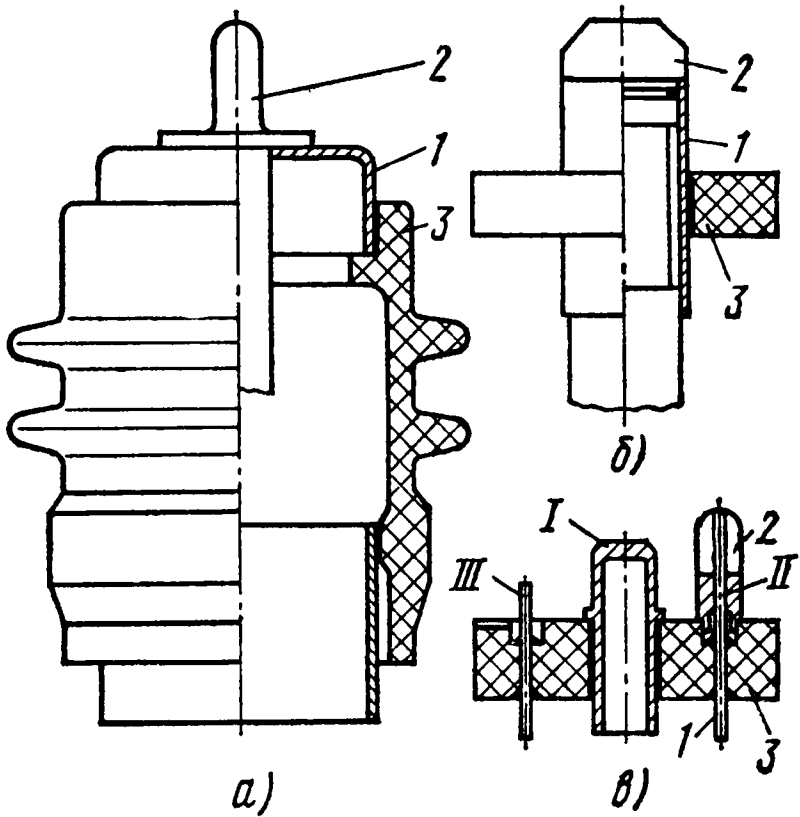


Рис. 29. Металлокерамические узлы с внутренними соединениями

манжеты приводит к снижению термостойкости и значительному увеличению расстояния a .

На рис. 28 показано одно из конструктивных решений, благодаря которому резко повышаются термомеханические характеристики узлов с охватывающими соединениями [13]. Толщина манжеты в зоне шва и прилежащих областях минимальна, поэтому термостойкость соединения высокая, а наружная цилиндрическая втулка воспринимает осевые механические нагрузки. Для того чтобы снизить окружные усилия,

возникающие в соединении от внешней манжеты, между манжетами помещают тонкий слой высокотемпературной смазки. В табл. 15 приведены термомеханические характеристики узлов, с коаксиально расчлененными манжетами из меди и ковара. Как видно, подобные узлы обладают предельными прочностными свойствами (разрушение происходит по керамике) и высокими термическими характеристиками.

Внутренние соединения. Внутренние соединения керамики с металлами (рис. 29) применяют сравнительно редко. Соединения, приведенные на рис. 29, а, целесообразно использовать с манжетами из ковара и сплавов Н-42, Н-46 при пайке припоями с температурой плавления до 800°C . Толщина манжет 0,15—0,4 мм. Диаметр соединения 5—40 мм. Толщину манжеты в зоне соединения можно увеличивать пропорционально увеличению диаметра соединения. Конструкции, аналогичные показанным на рис. 29, б, применяют в тех случаях, когда необходимо обеспечить повышенную прочность. При этом толщина манжеты 1 должна быть минимальна, а расстояние до ввода 2 не менее, чем определенное по формуле (24). Вводы, показанные на рис. 29, в, особенно типа III, широко применяют. Данную конструкцию используют в основном при пайке стеклоприпоями металлических проводников

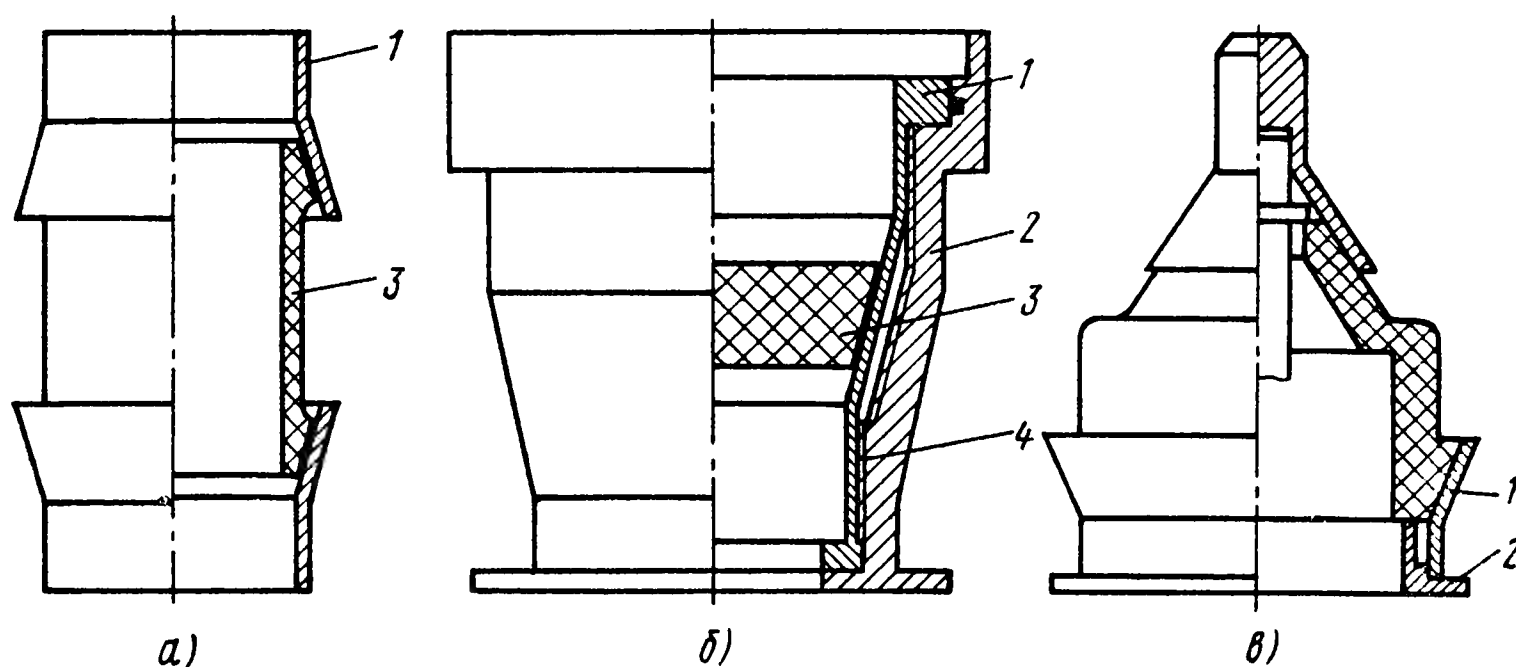


Рис. 30. Металлокерамические узлы с конусным соединением

из молибдена, вольфрама и их сплавов с рением. Диаметр металлических проводников 0,1—2,0 мм, предел прочности соединения на срез около 1000 кгс/см^2 , термостойкость в режиме $20-600-20^{\circ}\text{C}$ уменьшается с увеличением диаметра ввода и уменьшением ширины зоны шва.

К недостаткам соединений стеклоприпоями следует отнести пониженную ударную прочность.

Соединения типа I (рис. 29, в) используют в качестве штангелей при откачке вакуумноплотной оболочки. Материал манжеты — медь толщиной 0,3—0,5 мм. Диаметр соединения 8—15 мм.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую термическую стойкость внутренних соединений, выполненных с помощью стеклоприпоев, и достаточную прочность при эксплуатации, например для разъемов, на ввод 1 (рис. 29, в тип II) напаивают штекер 2. При этом дополнительное механическое крепление штекера производят по наружной или внутренней поверхности керамического основания 3.

Конусные соединения. Конусные соединения (рис. 30, а) занимают промежуточное положение между торцовыми и цилиндрическими. По характеру напряжений, возникающих в них, они идентичны охватывающим соединениям, поэтому для них приемлемы все рекомендации, изложенные выше.

Наиболее существенным преимуществом конусных соединений является отсутствие ограничений по диаметру соединения, так как при пайке всегда возможно обеспечить перемещение керамической детали относительно манжеты и тем самым сохранить оптимальный для капиллярной пайки зазор. Существенным недостатком таких соединений является трудность получения точных размеров по высоте узла и обеспечения хорошего прилегания сопрягаемых конусных поверхностей. Это особенно важно при больших диаметрах, так как толщина манжет должна быть минимальной.

Для предотвращения коробления тонкой манжеты иногда используют конструкцию, показанную на рис. 30, б. При этом во избежание припаивания манжеты 1 к поддерживающему конусу 2 перед сборкой последний покрывают составом (окись хрома, окись алюминия), который не смачивается припоем, применяемым при пайке. В том случае, когда необходимо получить точные размеры по высоте узла, паяют повторно (рис. 30, в). При этом вначале напаяют манжеты 1, а затем основания 2, что позволяет обеспечивать точность узла по высоте в пределах точности изготовления деталей 2 и керамического изолятора. Преимуществом подобных конструкций также является повышенная прочность узлов на сжатие и изгиб, так как при этом с тонкой манжеты снимается значительная доля нагрузок. Недостатком процесса изготовления узла является повторная пайка, которая снижает ресурс термостойкости соединения.

Комбинированные соединения. В большинстве случаев термическая и механическая прочность металлокерамических узлов находятся в обратно пропорциональной зависимости. Поэтому при полном или частичном снятии механических нагрузок с вакуумноплотного соединения и перенесении их на другие элементы узла значительно улучшаются термические и механические параметры конструкции. В этом случае термическая и механическая надежность будет определяться по элементам с максимальными параметрами. Таким образом, если один из параллельных функциональных элементов узла обладает максимальной надежностью, обусловленной термостойкостью, а второй — близкой к нулю и, наоборот, второй элемент — максимально высокой надежностью, обусловленной механической прочностью, а первый — низкой, то как термическая, так и механическая надежность подобной конструкции будет равна

$$P = 1 - Q_1 Q_2 \approx 1,$$

где Q_1 и Q_2 — ненадежность параллельных элементов.

При этом чем более независимы в функциональном отношении параллельные элементы узла, тем выше его конечные параметры, так как произведение $Q_1 Q_2$ стремится к нулю.

Наиболее приемлемыми конструкциями, в которых реализуется функциональное разделение элементов узла, являются узлы с комбинированными соединениями, с армированным изолятором и с компенсаторным кольцом, армированным металлом.

Узлы с комбинированными соединениями. В узлах подобного типа вакуумная плотность обеспечивается высокотермостойким соединением керамики с металлами, а механические нагрузки воспринимаются механически прочным соединением. Один из примеров дан на рис. 29, в, где нагрузки от штекера практически не передаются на внутреннее соединение, выполненное стеклоприпоем, а локализуются в более прочном соединении штекера с керамической деталью. Хорошие результаты обеспечиваются при сочетании торцовых компенсированных соединений с охватывающими или конусными (рис. 31). При этом торцовое соединение обеспечивает вакуумную плотность узла, а охватывающее соединение — жесткость конструкции. Толщину охватывающей манжеты выбирают в зависимости от усилий, которые должен выдерживать узел. На участке a торцовая манжета разгружена от механических усилий, поэтому ее толщина может быть минимальной. Согласно выражению (21) это позволяет резко повысить термическую прочность соединения.

Узел паяют в один прием. Охватывающие манжеты в процессе пайки выполняют функцию центрирующей оправки, однако во время сборки верхнюю манжету необходимо крепить путем отбортовки или приваркой к основанию. Габариты таких узлов ограничены. При использовании для охватывающих соединений коваровых манжет

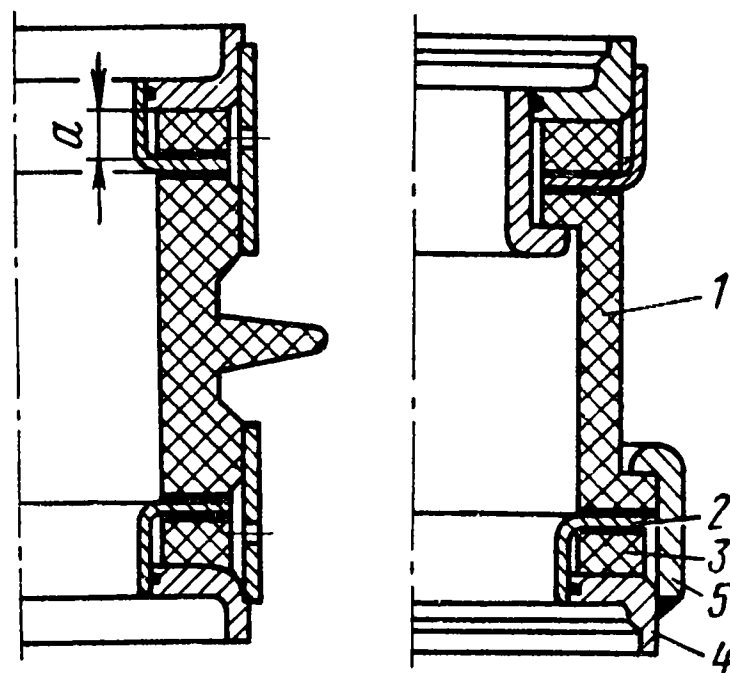


Рис. 31. Металлокерамический узел с комбинированным соединением

Рис. 32. Узел с армированным изолятором:

1 — изолятор; 2 — манжета; 3 — керамический компенсатор; 4 — основание; 5 — обойма

(или из аналогичных материалов) и пайке припоем ПСр 72 можно изготавливать узлы наружным диаметром до 100—120 мм; при использовании медных манжет — до 30—40 мм. Механическая прочность такой конструкции повышается в 15—20 раз. Если в узлах обычной торцевой конструкции диаметром 50 мм деформация, равная 0,1 мм, наблюдается при нагрузке 123 кгс, то в узлах с комбинированным соединением того же диаметра при охватывающей манжете из кобальта толщиной 0,5 мм такая деформация наступает при нагрузке 1400 кгс, а при толщине манжеты до 1,0 мм — 2100 кгс.

Недостатком такой конструкции является ограничение габаритов узла по диаметру, уменьшение эффективной длины керамического изолятора, а также некоторое усложнение технологии изготовления керамических деталей вследствие дополнительной обработки под охватывающее соединение.

Узлы с армированным изолятором. На рис. 32 показан способ

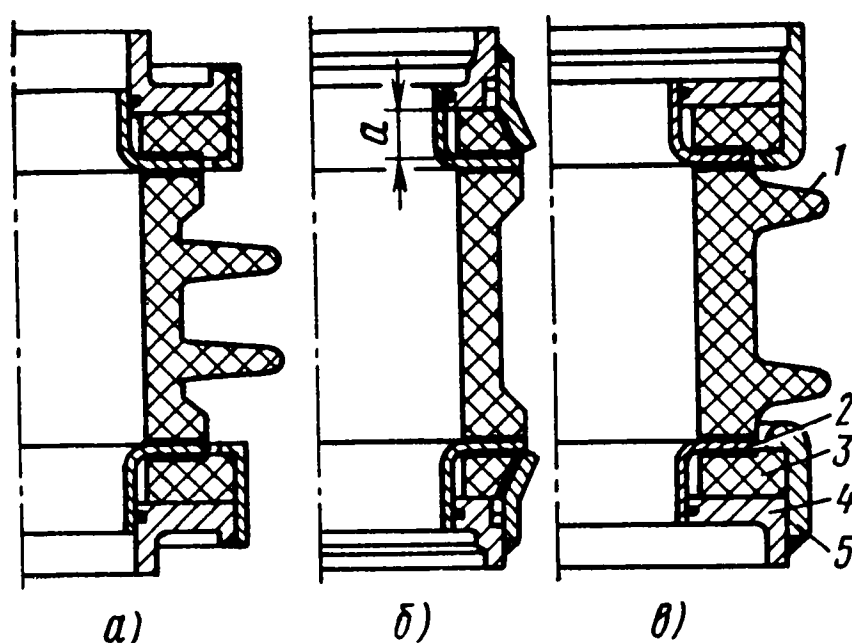


Рис. 33. Узлы с компенсатором, армированным металлом:

1 — изолятор; 2 — манжета; 3 — керамическое компенсаторное кольцо; 4 — основание; 5 — обойма

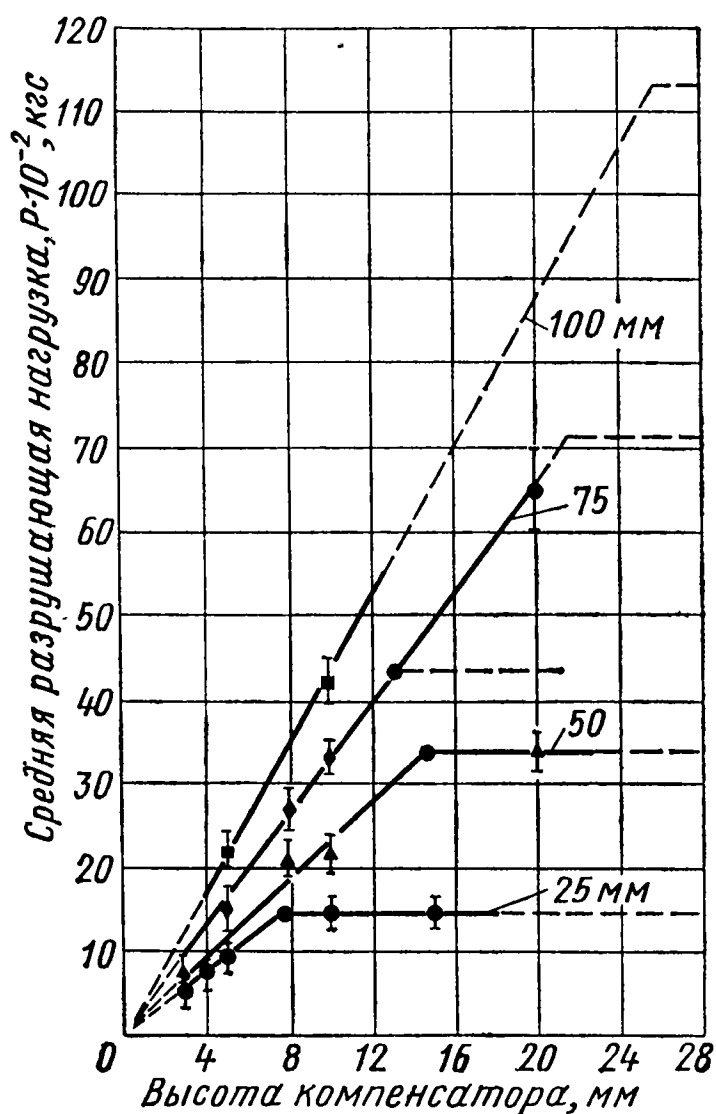


Рис. 34. Зависимость прочности металлокерамических узлов с компенсатором, армированным металлом, от высоты компенсаторного кольца для соединения различных диаметров

разгрузки торцового компенсированного соединения. Механическая прочность и формоустойчивость рассматриваемой конструкции определяются прочностью керамического изолятора и армирующей обоймы [12]. Механические усилия передаются от изолятора 1 к основанию 4 через обойму 5, минуя шов и манжету 2.

Узел паяют в один прием, можно изготавливать узлы любых габаритов. Термическая прочность узла повышена вследствие значительного увеличения ширины зоны шва. Этот вариант особенно эффективен в тех случаях, когда при использовании тонкостенных керамических деталей необходимо получить термически и механически прочный узел.

Исследования, проведенные на узлах диаметром 50 мм, показали, что деформация, равная 0,1 мм, наступает при нагрузках 2400 кгс (только за счет удлинения обоймы 5).

Недостатком такой конструкции является сложность изготовления узлов и шлифования керамических деталей с выступом по внутреннему диаметру, а также трудность крепления верхней обоймы к основанию.

Использовать керамические детали только с наружными выступами практически невозможно, так как в этом случае необходимо применять разрезные обоймы, которые не обеспечивают равномерное и равнопрочное крепление изолятора к основанию. Как и в предыдущем случае, эффективная длина керамического изолятора несколько уменьшается.

Металлокерамические узлы с армированным компенсаторным кольцом. На рис. 33 показаны различные узлы с армированным компенсаторным кольцом. Процесс изготовления этих узлов состоит из двух последовательных операций. Сначала пайкой (рис. 33, б, в) или сваркой (рис. 33, а) обоймы 5 с основанием 4 закрепляют компенсаторное кольцо 3. Затем узел окончательно паяют с использованием манжет, изолятора и компенсаторного кольца, закрепленного в основании [12].

Механическая прочность такой конструкции определяется прочностью соединения, компенсаторного кольца и армирующей обоймы. На участке а манжета разгружена от действующих на узел нагрузок за счет обоймы, что позволяет выбирать ее толщину исходя, согласно выражению (21), из заданной термостойкости соединения.

Варианты, представленные на рис. 33, в, практически одинаковы, однако верхний вариант технологически несколько проще вследствие простоты изготовления основания 4.

Узлы, в которых армирование компенсаторного кольца осуществляется путем сварки (см. рис. 33, а), целесообразнее применять в крупносерийном производстве, так как значительно упрощается изготовление и повышается производительность.

Для армирования компенсаторных колец в металлокерамических узлах, представленных на рис. 33, а и в, можно использовать обоймы, изготовленные из различных материалов. Прочность и формоустойчивость таких узлов в 3—20 раз больше, чем узлов обычной конструкции, и при достаточной прочности соединения зависят от толщины и прочностных свойств материала обоймы.

Так, при изготовлении обоймы из нержавеющей стали деформации практически не наблюдаются вплоть до разрушения соединения, в то время как узлы с обоймой из меди начинают деформироваться еще до разрушения. В случае использования медной обоймы деформацию можно исключить путем увеличения толщины армирующего элемента. Однако это может привести к неоправданному увеличению габаритов и массы узла.

Механически прочной является конструкция узла с компенсаторным кольцом, армированным по конусу (см. рис. 33, б). Такую конструкцию можно применять в том случае, когда ограничены габариты узла. Термическая прочность узла несколько ниже ввиду влияния напряжений, передаваемых на торцовое соединение от манжеты, спаянной с компенсаторным кольцом.

При конструировании металлокерамических узлов с компенсаторным кольцом, армированным металлом (см. рис. 33, в), следует учитывать, что механическая прочность в значительной мере зависит от высоты компенсаторного кольца [14]. На рис. 34 показана зависимость прочности узлов с соединениями диаметром 25—100 мм от высоты компенсаторного кольца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветиков В. Г., Неделько Э. Е., Френкель Э. Б. Свойства и применение вакуумноплотного керамического материала «Сапфирит». — «Обмен опытом в радиопромышленности», 1970, № 10, с. 35—38.
2. Балкевич В. Л. Техническая керамика. М., Стройиздат, 1968, 200 с.
3. Батыгин В. Н., Метелкин И. И., Павлова М. А. Новый метод пайки неметаллизированной керамики с металлами. — «Электронная техника», серия 1. «Электроника СВЧ», 1969, вып. 6, с. 120—124.
4. Батыгин В. Н., Котюргина О. А. Алюмооксидная керамика А-995 и ее спаи с металлами. — «Электронная техника», серия 14, «Материалы», 1968, вып. 7 (15), с. 62—72.
5. Ерошев В. К. Металлокерамические вакуумноплотные конструкции. М., «Энергия», 1970, 160 с.
6. Ерошев В. К. Исследование плотности распределения термостойкости металлокерамических спаев. — «Электронная техника», серия 14, «Материалы», 1970, вып. 4, с. 113—119.
7. Ерошев В. К. Расчет термической надежности металлокерамических спаев. — «Электронная техника», сер. 14, «Материалы», 1971, вып. 4, с. 65—73.
8. Керамика и ее спаи с металлом в технике. М., «Атомиздат», 1969, 232 с. Авт: В. А. Преснов, М. Л. Любимов, В. В. Строганова и др.
9. Кингери У. Д. Введение в керамику. Пер. с англ. под ред. П. П. Будникова и Д. Н. Полубояринова. М., «Стройиздат», 1964, 534 с.
10. Новая керамика. М., «Стройиздат», 1969, 312 с. Авт: П. П. Будников, И. А. Булавин, Г. А. Выдрик и др.
11. Огнеупоры для космоса. Пер. с англ. Я. А. Орловского. М., «Металлургия», 1967, 266 с.

12. Павлова В. Д., Ерошев В. К., Аветиков В. Г. Исследование и разработка металлокерамических узлов повышенной механической прочности. — «Электронная техника», сер. 10, «Технология и организация производства», 1969, вып. 6 (30), с. 69—75.

13. Павлова В. Д., Макарова Л. В., Ерошев В. К. Охватывающие металлокерамические спаи с коаксиальнорасчлененной манжетой. — В кн.: Технология и оборудование высокотемпературной пайки. М., изд-во МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1973, с. 125—127.

14. Павлова В. Д. Исследование влияния элементов конструкции торцовых металлокерамических спаев на механическую прочность узлов ЭВП. — «Электронная техника», сер. 6, «Материалы», 1972, вып. 9, с. 79—84.

15. Рений в новой технике. Труды III

Всесоюзного совещания по проблеме рения. М., «Наука», 1970, Ч. II, 204 с.

16. Труды конференций по электронной технике. Вып. I. М., изд-во ЦНИИТЭИН МЭП, 1966, 200 с.

17. Шмелев А. Е., Жмудь Е. С., Воеводина Р. И. Исследование процессов пайки титана с керамикой — В кн.: Пайка в машиностроении. (Материалы конференции.). М., изд-во МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1967, сб. 1, с. 130—137.

18. Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надежности. М., «Советское радио», 1968, 288 с.

19. Электроннолучевая сварка металлокерамических узлов. — «Автоматическая сварка», 1973, № 1 (238), с. 41—42, Авт.: В. М. Качалов, Н. А. Ольшанский, М. П. Малолетов и др.

ПРОЧНОСТЬ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

ВИДЫ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Прочность соединений встык определяется напряжением

$$\sigma = \frac{N}{F} \leq [\sigma']_p, \quad (1)$$

где F — площадь поперечного сечения элемента; $[\sigma']_p$ — допускаемое напряжение паяного шва при растяжении (или сжатии).

Прочность косых швов можно рассчитывать по аналогичной формуле. При этом напряжение на косой плоскости

$$\sigma = \frac{N}{F'} \leq [\tau']_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где F' — площадь шва; $[\tau']$ — допускаемое напряжение паяного стыкового шва при срезе.

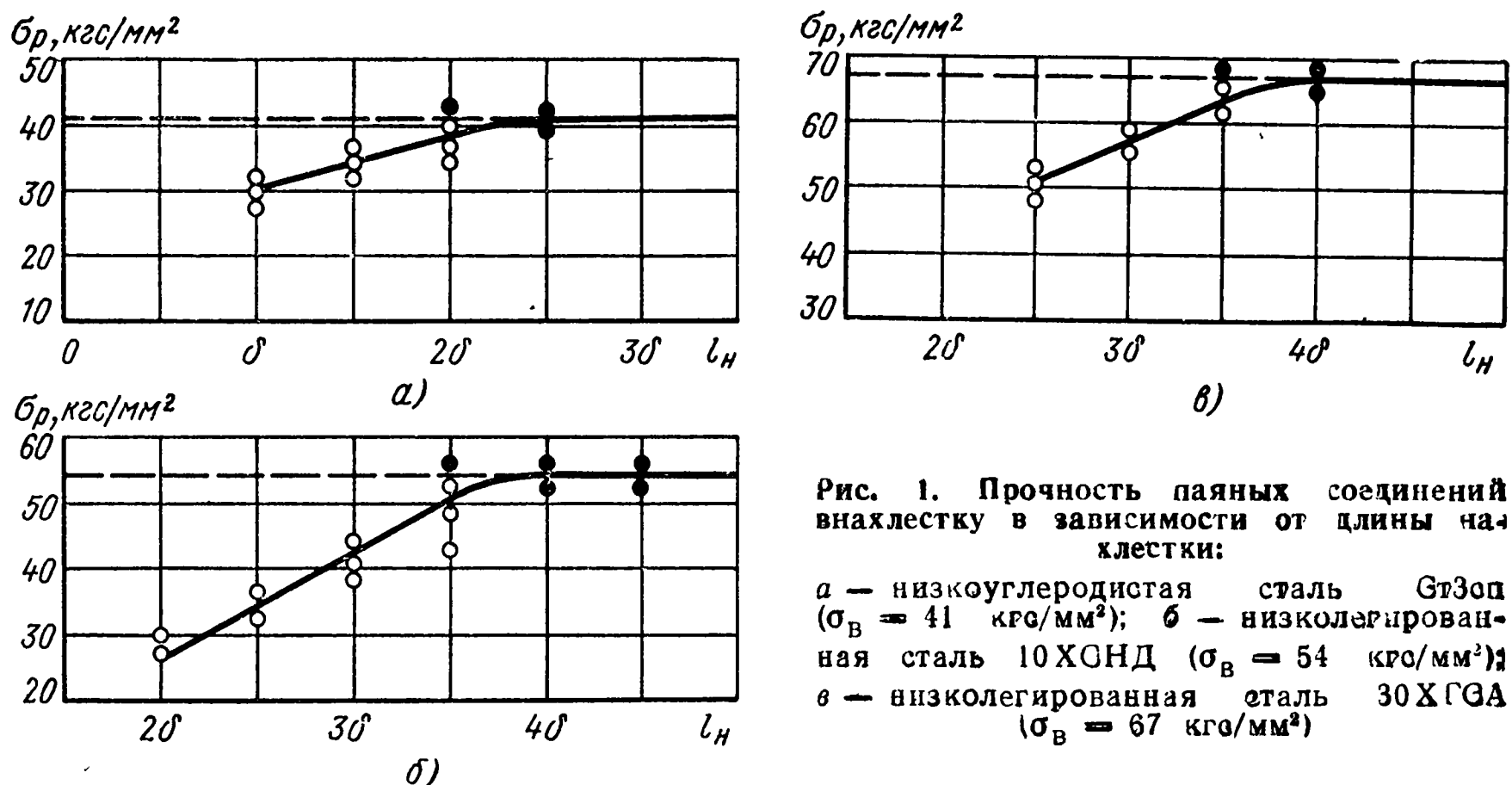


Рис. 1. Прочность паяных соединений внахлестку в зависимости от длины нахлестки:

а — низкоуглеродистая сталь Ст3сп ($\sigma_B = 41 \text{ кгс/мм}^2$); б — низколегированная сталь 10ХСНД ($\sigma_B = 54 \text{ кгс/мм}^2$); в — низколегированная сталь 30ХГДА ($\sigma_B = 67 \text{ кгс/мм}^2$)

Соединения внахлестку при пайке обеспечивают равнопрочность соединения и основного металла. Длину нахлестки находят из соотношения

$$[\sigma]_p F = [\tau']_{\text{ср}} b l, \quad (3)$$

где F — площадь поперечного сечения основного элемента; $[\tau']$ — допускаемое напряжение при срезе паяных внахлестку швов; b — ширина соединяемых элементов; l — протяженность паяного шва, т. е. требуемая протяженность паяного шва

$$l = \frac{F [\sigma]_p}{b [\tau']}. \quad (4)$$

На рис. 1 показана прочность паяных соединений из разных сталей в зависимости от длины нахлестки. Пайка элементов производилась медно-цинковым припоем Л62

В соединениях полос с элементами уголкового профиля протяженность паяного шва значительно увеличивается в зависимости от соотношений толщин соединяемых элементов. Однако условие равнопрочности может быть также выполнено.

Нахлестку применяют в телескопических трубчатых конструкциях. Длина нахлестки в таких соединениях при растягивающих усилиях определяется из соотношения

$$l = \frac{F [\sigma]_p}{2\pi R [\tau']}, \quad (5)$$

где R — радиус трубы.

Паяные швы в соединениях втавр редко работают на растяжение, чаще — на срез в конструкциях, испытывающих изгибающие усилия.

Напряжение среза в швах

$$\tau = \frac{QS}{J\delta}, \quad (6)$$

где Q — поперечная сила в элементе, испытывающем поперечный изгиб; J — момент инерции всего сечения; δ — толщина вертикального листа, равная протяженности шва; S — статический момент площади пояса относительно центра тяжести сечения.

В большинстве случаев напряжения среза в поясных швах при поперечном изгибе незначительны и намного ниже допускаемых при срезе.

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ВСТЫК

Паяные соединения встык работают под нагрузкой аналогично сварным с мягкой прослойкой. Прочность соединений с мягкой прослойкой хорошо изучена и описана в трудах ученых кафедры «Сварочное производство» Челябинского политехнического института (д-ром техн. наук проф. Бакши О. А. и др.). Особенности паяных соединений встык следующие: предел текучести паяного шва — мягкой прослойки — меньше предела текучести основного металла соединяемых частей; модуль упругости паяного шва E' меньше модуля упругости основного металла E . В мягких прослойках при сварке, как правило, E' мало отличается от E .

При работе соединения встык в пределах упругих деформаций прослойка испытывает упрочнение. В результате диффузии основного металла в припой повышаются прочностные свойства последнего, в частности, возрастает его предел текучести. Продольные деформации в основном металле $\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$ вызывают поперечное сужение, равное $\mu\epsilon_z$; продольные деформации в прослойке $\epsilon'_z = \frac{\sigma_z}{E'}$ обуславливают поперечное сужение прослойки $\mu\epsilon'_z$, которое больше $\mu\epsilon_z$ (μ — коэффициент Пуассона).

В паяных соединениях стержней круглых поперечных сечений в результате неодинакового поперечного сужения стержня и прослойки на границе в стержне возникают сжимающие напряжения. Кольцевая прослойка подвергается равномерному растяжению по радиальным направлениям при напряжениях

$$\sigma_r = E'(\epsilon'_z - \epsilon_z) \mu. \quad (7)$$

В прослойке образуются также растягивающие напряжения в окружном направлении $\sigma_t = \sigma_r$.

Таким образом, в пределах упругих деформаций в кольцевой прослойке реализуется трехосное растяжение, вызывающее концентрацию. Концентрация невелика, так как напряжения σ_r и σ_t значительно меньше σ_z , но их возникновение способствует повышению предела текучести и понижению пластичности прослойки.

В пластическом состоянии поле напряжений в мягкой прослойке толщиной δ_0 (рис. 2) изображено на рис. 3. Предел текучести прослойки при одноосном напряженном состоянии обозначим σ_T .

Из теории пластичности известно, что наибольшие по величине напряжения возникают в прослойке на контактных поверхностях.

Если допустить, что модули упругости прослойки E' и основного металла E близки, то нормальные напряжения в прослойке

$$\sigma_z = \sigma_T \left[1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\delta} (R - r) \right]. \quad (8)$$

Напряжения по радиусу и касательной

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma_T \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\delta} (R - r), \quad (9)$$

где R — радиус стержня цилиндрической формы; δ — толщина зоны сплавления; r — радиус, определяющий положение точки в сечении.

Наибольшие напряжения при $r = 0$, т. е.

$$\sigma_z = \sigma_T \left[1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{\delta} \right]; \quad (10)$$

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma_T \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{\delta}. \quad (11)$$

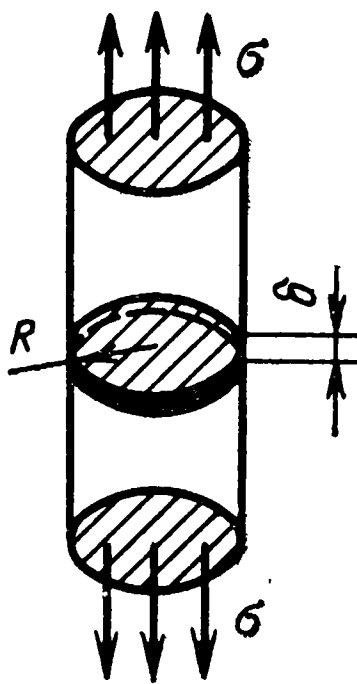


Рис. 2. Паяное соединение встык с мягкой прослойкой

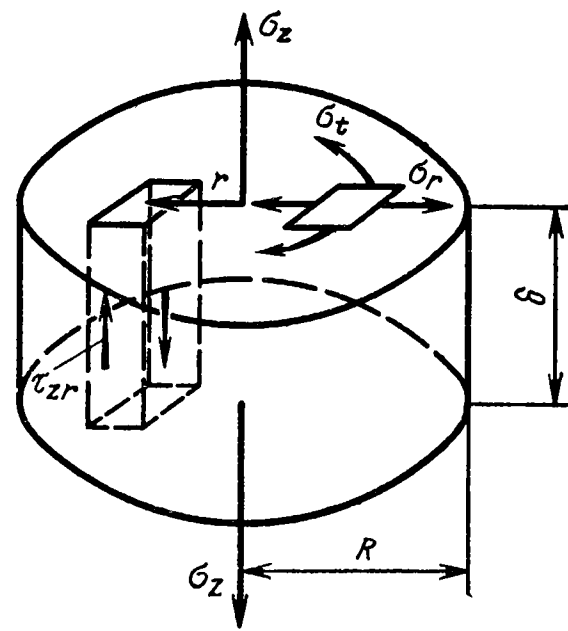


Рис. 3. Поле напряжений на контактных поверхностях соединения встык с мягкой прослойкой

Так как в тонких прослойках, имеющих место при пайке, отношение $\frac{R}{\delta}$ очень велико, то напряженное состояние, описываемое формулами (10) и (11), невозможно. Задолго до образования в сечении полной текучести напряжения σ_z достигают такой величины, при которой происходит разрушение стержня, т. е. пластический характер разрушений невозможен. Разрушение прослойки хрупкое. Аналогичное явление наблюдается в стержнях с поперечными сечениями некруглой формы.

Характер работы паяной прослойки при модуле упругости E' , приближающемся к весьма малой величине, отличается от рассмотренного при $E' = E$.

Однако и в этом случае текучесть на контактных поверхностях возможна лишь при весьма больших значениях σ_z , ведущих к разрушению стержней. Таким образом, при всех значениях $E' \neq E$ мягкие прослойки при пайке встык разрушаются хрупко [6].

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ВНАХЛЕСТКУ

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ НЕРАВНОМЕРНОЙ РАБОТЫ СПАЯ ПО ДЛИНЕ

Распределение касательных напряжений q по длине нахлестки в направлении действия сил происходит неравномерно и почти аналогично распределению напряжений в сварных фланговых швах. Для соединения двух деталей с равными площадями поперечных сечений F (рис. 4) наибольшее значение q на единицу длины паяного шва в концевых точках определяется следующим уравнением [7]:

$$q_{\max} = \frac{\alpha P}{2} \left(\frac{1 + \operatorname{ch} \alpha l}{\operatorname{sh} \alpha l} \right), \quad (12)$$

где l — длина нахлестки;

$$\alpha = \sqrt{\frac{2Gb}{Ef\delta_0}}; \quad (13)$$

здесь G — модуль упругости паяного шва при сдвиге; b — ширина образца основного металла; E — модуль упругости основного металла при растяжении; δ_0 — толщина мягкой прослойки (зоны сплавления).

Если из условия статической равнопрочности паяного шва и основного металла принять $l = 2\delta$, $F = \delta b$ (δ — толщина основного металла), то

$$\alpha l = \sqrt{\frac{2Gb l^2}{EF\delta_0}} = \sqrt{\frac{8G\delta}{E\delta_0}}. \quad (14)$$

Коэффициент концентрации напряжений в паяном шве

$$\beta = \frac{q_{\max}}{q_0} = \frac{\alpha P}{2} \left(\frac{1 + \operatorname{ch} \alpha l}{\operatorname{sh} \alpha l} \right) \frac{l}{P} = \frac{\alpha l}{2} \left(\frac{1 + \operatorname{ch} \alpha l}{\operatorname{sh} \alpha l} \right). \quad (15)$$

Если принять модуль упругости мягкой прослойки медно-цинкового припоя Л162 равным $10\,000$ кгс/мм², модуль сдвига $G = 4000$ кгс/мм², модуль упругости стали $E = 20\,000$ кгс/мм², то $G/E = 0,4$. Чем меньше величина отношения G/E , тем меньше коэффициент концентрации.

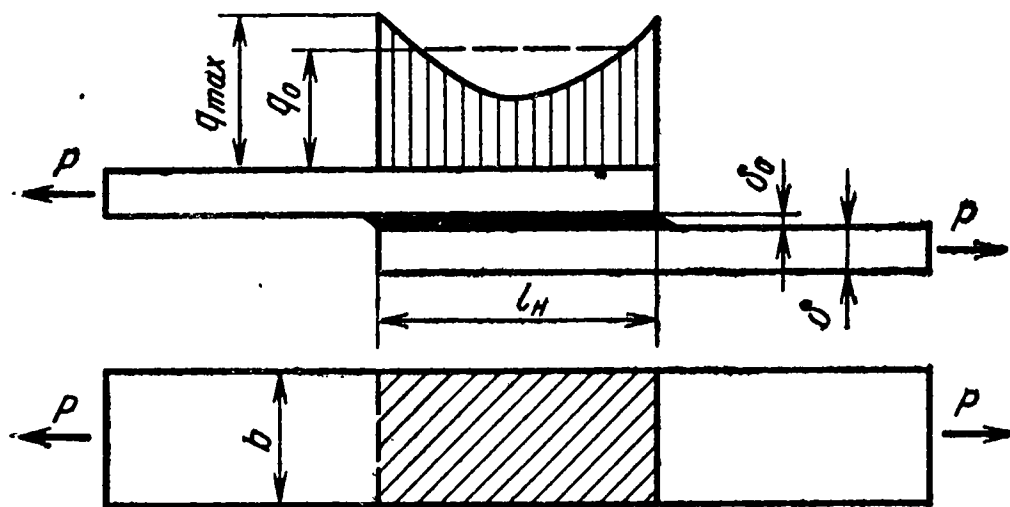


Рис. 4. Паяное соединение внахлестку, нагруженное осевыми силами

Выравнивание касательных напряжений и устранение концентрации напряжений возможно лишь при очень больших пластических деформациях. При малых пластических деформациях концентрация напряжений в паяных швах возникает и монотонно снижается в процессе деформирования.

Образование пластических деформаций в соединениях внахлестку сопровождается снижением коэффициентов концентрации напряжений в крайних точках соединений и выравниванием эпюры распределения q (см. рис. 4) по длине соединения, что характерно для паяных швов.

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЗВАННАЯ ИЗГИБОМ ЭЛЕМЕНТОВ

Паяные соединения внахлестку, как и сварные (точечные и роликовые), имеют эксцентриситеты, которые вызывают образование дополнительных изгибающих моментов.

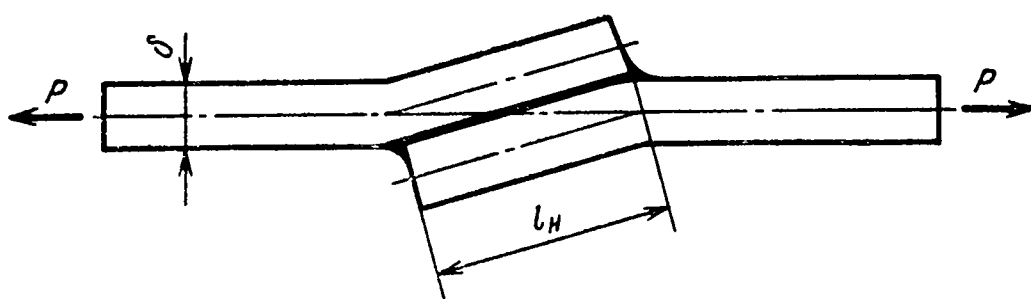


Рис. 5. Паяное соединение внахлестку

Каждый из элементов соединения при растяжении изгибается (рис. 5). Дифференциальное уравнение изогнутого элемента [4]

$$\frac{d^2 y}{dx^2} EJ - Py = 0, \quad (16)$$

где EJ — жесткость соединяемых полос при изгибе; P — растягивающее усилие. После преобразований

$$\frac{d^2 y}{dx^2} - \alpha^2 y = 0, \quad (17)$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{P}{EJ}}$.

Решение данного уравнения дает выражение для величины наибольшего изгибающего момента:

$$M = \frac{\delta \alpha^2}{2e \frac{-\alpha l_n}{2}} EJ. \quad (18)$$

Величина напряжений от изгиба

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M}{W}, \quad (19)$$

где W — момент сопротивления элемента при изгибе. После подстановки значений J , W , α и преобразования уравнения (19) получаем

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{3\sigma_0}{1 + \frac{l_n}{\delta} \sqrt{\frac{3\sigma_0}{E}}}, \quad (20)$$

где σ_0 — напряжение в элементах от растягивающих усилий; l_n — длина нахлестки; δ — толщина элементов.

Из уравнения (20) следует, что величина изгибающего напряжения зависит от длины нахлестки и толщины элементов: чем больше нахлестка и чем тоньше паяемые элементы, тем меньше величина изгибающих напряжений.

Теоретический коэффициент концентрации

$$K_T = 1 + \frac{\sigma_{\text{и}}}{\sigma_0}. \quad (21)$$

При значениях $\delta \rightarrow 0$ напряжения от изгиба стремятся к нулю, $K_T = 1$, при больших толщинах возрастают, $K_T = 4$.

СОБСТВЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В ПАЯНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Собственными или внутренними напряжениями называют напряжения, существующие в материале без приложения внешних сил [4]. В зависимости от объема, в котором уравниваются собственные напряжения, они подразделяются на собственные напряжения первого рода, уравнивающиеся в микрообъемах, соизмеримых с размерами изделия; второго рода, уравнивающиеся в микрообъемах в пределах одного или нескольких зерен металла, и третьего рода, уравнивающиеся в ультрамикрообъемах в пределах кристаллической решетки металлов. Собственные напряжения первого рода определяются методами сопротивления материалов, теории упругости, теории пластичности, а также экспериментально. Собственные напряжения второго и третьего рода находят опытным путем на основе анализа рентгенограмм.

В зависимости от направления в пространстве собственные напряжения могут быть линейные или одноосные, плоскостные или двухосные и объемные или трехосные. Основной особенностью собственных напряжений является то, что они образуют взаимоуравновешенную систему сил.

В паяных конструкциях собственные напряжения — результат предшествующей обработки или сборки. Непосредственно при пайке собственные напряжения могут возникнуть в результате неравномерного местного нагрева, а также структурных и фазовых превращений в металле. Значения собственных напряжений, возникающих в процессе пайки, зависят от состава и структуры основного металла, соотношения толщин соединяемых элементов деталей, ширины паяного шва и технологического процесса пайки. Наибольших значений собственные напряжения достигают при пайке разнородных материалов.

При изготовлении паяных конструкций приходится соединять металлы с различными физико-химическими свойствами, а также металлы со стеклом, графитом, керамикой, полупроводниками и т. п. Так, в машиностроении широкое применение находит пайка пластинок из твердых сплавов с конструкционными сталями [9].

Различие в значениях температурных коэффициентов линейного расширения указанных материалов ведет к образованию в паяном шве собственных температурных напряжений.

Значения температурных коэффициентов линейного расширения металлов, применяемых в паяных конструкциях, приведены в табл. 1. Температурные коэффициенты линейного расширения сплавов имеют значения, близкие к значениям температурных коэффициентов линейного расширения основы сплава. Например, для алюминиевых сплавов АМц $\alpha = 23,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ и АМг $\alpha = 23,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Температурные коэффициенты линейного расширения низкоуглеродистых сталей мало отличаются от коэффициента линейного расширения железа. Для наиболее распространенной нержавеющей стали 12Х18Н9Т $\alpha = 14,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

1. Температурные коэффициенты линейного расширения металлов α

Металл	Химический знак	Значения α при 0—100 $^\circ\text{C}$, $10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$	Металл	Химический знак	Значения α при 30—100 $^\circ\text{C}$, $10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$	Металл	Химический знак	Значения α при 0—100 $^\circ\text{C}$, $10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Алюминий	Al	23,1	Кобальт	Co	12,5	Никель	Ni	13,5
Вольфрам	W	4,4	Магний	Mg	26,1	Олово	Sn	22,5
Железо	Fe	11,5	Марганец	Mn	22,0	Свинец	Pb	28,1
Кадмий	Cd	31,0	Молибден	Mo	5,3	Серебро	Ag	18,7
Кремний	Si	6,9	Медь	Cu	16,5	Цинк	Zn	39,5
						Хром	Cr	8,4

В общем случае производят пайку элементов с неодинаковыми физико-механическими свойствами, имеющими разные площади поперечного сечения. Модуль упругости E_1 , площадь поперечного сечения F_1 и коэффициент температурного расширения обозначим α_1 (в элементе 1) и соответственно E_2 ; F_2 ; α_2 (для элемента 2). Обозначим температуру, с которой начинается образование упруго-пластических деформаций элемента 1, через T_1 , а элемента 2 — через T_2 . Значения T_1 и T_2 представляют собой некоторые условные величины.

Пайка симметричного соединения [6]

При температуре T_1 в элементе 1 начинается накопление упруго-пластических деформаций. При его остывании в свободном состоянии изменение длины

$$\delta_1 = \alpha_1 (T_1 - T_0) l,$$

(22)

где T_0 — температура соединения после полного остывания.

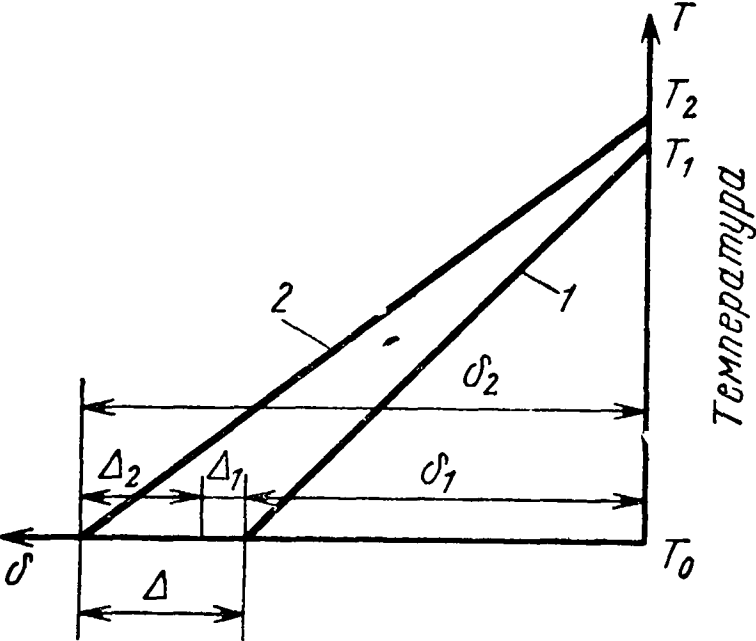


Рис. 6. Схема образования упруго-пластических деформаций соединения при его остывании

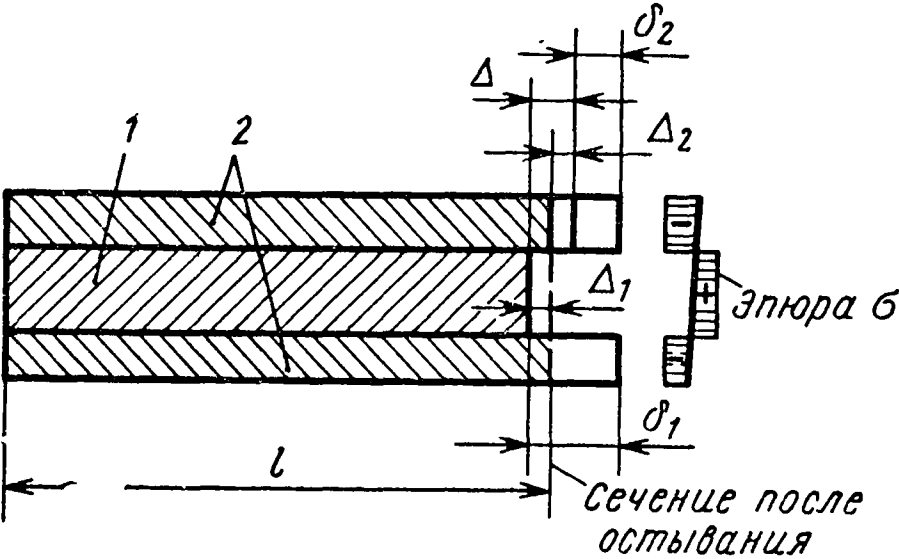


Рис. 7. Образование остаточных напряжений в разнородных пластинах при остывании

Соответственно изменение длины элемента 2 после полного остывания

$$\delta_2 = \alpha_2 (T_2 - T_0) l,$$

(23)

На рис. 6 дана схема образования упруго-пластических деформаций соединения при его остывании. При $T = T_0$ свободные удлинения соответственно равны Δ_1 и Δ_2 . Сумма их

$$\Delta = \delta_2 - \delta_1.$$

В действительности элементы жестко соединены. Сечения их остаются плоскими, а вследствие этого элемент 1 должен упруго или упруго-пластически удлиниться на величину Δ_1 , а элемент 2 укоротиться на Δ_2 , т. е. элемент 1 растягивается, а элемент 2 сжимается (рис. 7).

Положение поперечного сечения спаянных элементов определяется условием статического равновесия — взаимного уравнивания внутренних сил.

По длине элементов собственные напряжения распределяются неравномерно. По концам на свободных поверхностях они равны нулю. Наибольших значений

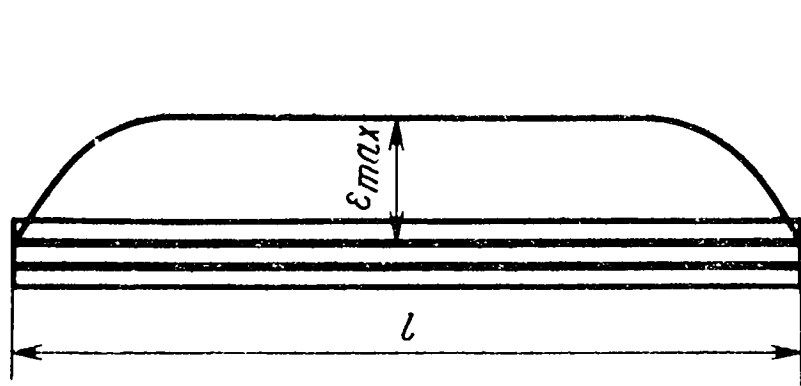


Рис. 8. Распределение упругих деформаций ε по длине длинных паяных пластин

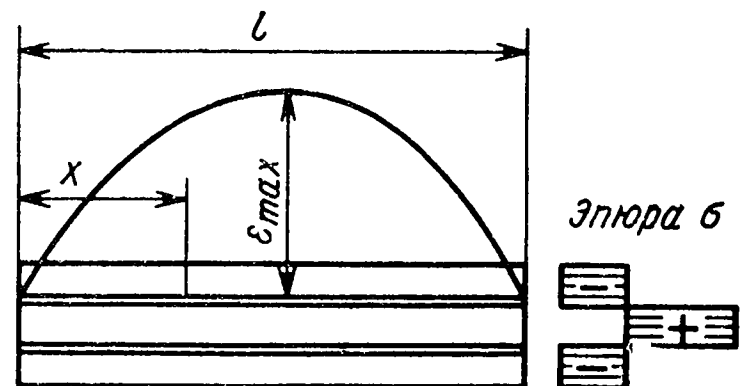


Рис. 9. Распределение упругих деформаций ε по длине коротких паяных пластин

напряжения достигают по середине длины образцов. Если паяные образцы имеют значительную длину, то на некотором участке распределение деформаций по длине происходит равномерно (рис. 8). Если длина элементов незначительна, то распределение деформаций по длине может быть приближенно принято по закону квадратной параболы (рис. 9).

При небольшой длине элементов упругие деформации в них определяются соотношением

$$\varepsilon = \frac{4\varepsilon_{\max}}{l} x(l-x), \quad (24)$$

где ε — упругая деформация на расстоянии x от конца элемента; l — длина соединяемых деталей; $\varepsilon_{\max}$ — наибольшая упругая деформация посередине; x — текущая координата.

На длине l полная деформация элемента

$$\Delta_1 = \frac{2}{3} \varepsilon_{\max} l. \quad (25)$$

Из этого соотношения для элемента 1

$$\varepsilon_{1\max} = 1,5 \frac{\Delta_1}{l}. \quad (26)$$

Аналогично для элемента 2

$$\varepsilon_{2\max} = 1,5 \frac{\Delta_2}{l}. \quad (27)$$

Условие равновесия внутренних сил запишем в виде

$$2\varepsilon_{\max} E_1 F_1 - \varepsilon_{2\max} E_2 F_2 = 0, \quad (28)$$

откуда

$$\frac{\varepsilon_{1\max}}{\varepsilon_{2\max}} = \frac{E_2 F_2}{2E_1 F_1}. \quad (29)$$

Сумма удлинений

$$\Delta_1 + \Delta_2 = \Delta. \quad (30)$$

С учетом уравнений (26) и (27)

$$\frac{2}{3} \varepsilon_{1 \max} l + \frac{2}{3} \varepsilon_{2 \max} l = \Delta. \quad (31)$$

Тогда

$$\varepsilon_{1 \max} = \frac{1,5 \frac{\Delta}{l}}{1 + \frac{2E_1 F_1}{E_2 F_2}}; \quad (32)$$

$$\varepsilon_{2 \max} = \frac{1,5 \frac{\Delta}{l}}{1 + \frac{E_2 F_2}{2E_1 F_1}}. \quad (33)$$

Наибольшие нормальные собственные напряжения $\sigma_{1 \max}$ и $\sigma_{2 \max}$, возникающие при остывании элементов 1 и 2,

$$\sigma_{1 \max} = \frac{1,5 \Delta \frac{E_1}{l}}{1 + \frac{2E_1 F_1}{E_2 F_2}}; \quad (34)$$

$$\sigma_{2 \max} = \frac{1,5 \Delta \frac{E_2}{l}}{1 + \frac{E_2 F_2}{2E_1 F_1}}. \quad (35)$$

Если толщины соединяемых элементов одинаковы, то $F_1 = F_2$, тогда

$$\sigma_{1 \max} = \frac{1,5 \Delta \frac{E_1}{l}}{1 + 2 \frac{E_1}{E_2}}. \quad (36)$$

Наибольшее значение $\sigma_{1 \max}$ имеет, если второе слагаемое в знаменателе приближается к нулю, т. е. когда E_2 велико по сравнению с E_1 .

Если $E_1 = E_2 = E$ и деформации элементов 1 и 2 различны лишь из-за различных теплофизических свойств деталей температурных коэффициентов линейного расширения, то

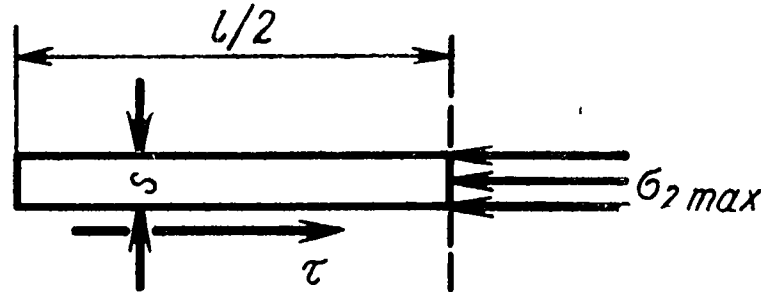


Рис. 10. Образование напряжений среза в паяном шве

$$\sigma_{1 \max} = \frac{\Delta E}{2l}.$$

Аналогично

$$\sigma_{2 \max} = \frac{1,5 \Delta \frac{E_2}{l}}{1 + \frac{E_2}{2E_1}}. \quad (37)$$

В этом случае напряжение $\sigma_{2 \max}$ растет с увеличением модуля упругости E_1 .

Значения напряжений $\sigma_{1 \max}$ и $\sigma_{2 \max}$ пропорциональны величине Δ . При значительной величине Δ остаточные напряжения могут достигать предела текучести.

В месте контакта соединяемых элементов возникают касательные напряжения (рис. 10), определяемые из условия

$$\sigma_{2 \max} S b - \tau \frac{l}{2} b = 0, \quad (38)$$

где b — ширина соединяемых элементов; S — их толщина; τ — касательные напряжения в плоскости спая, т. е.

$$\tau = \frac{\sigma_{2 \max} S}{l/2}. \quad (39)$$

Касательное напряжение τ растет с увеличением отношения толщины элемента к его длине. Обычно S/l во много раз меньше единицы, поэтому срезающие напряжения в плоскости спая значительно меньше нормальных остаточных напряжений в элементах.

В рассматриваемом случае деформации паяных элементов симметричны.

Пайка несимметричного соединения двух элементов с площадями поперечных сечений F_1 и F_2 , модулями упругости E_1 и E_2 , разными температурными коэффициентами линейного расширения (рис. 11).

При остывании свободная деформация элемента 1 и свободная деформация элемента 2 будут неодинаковыми. Разность их обозначим Δ (рис. 11, а, б).

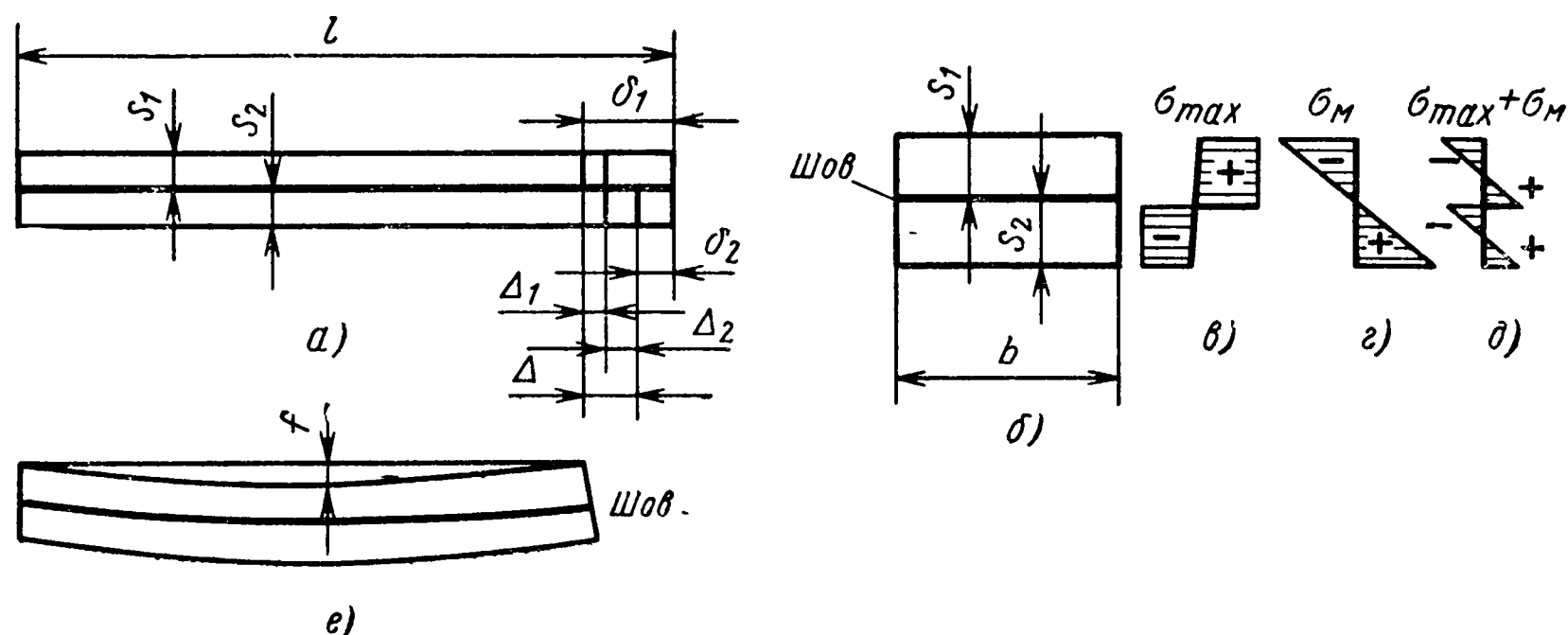


Рис. 11. Процессы образования остаточных напряжений и деформаций при пайке двух элементов

Примем, что распределение нормальных остаточных деформаций и напряжений по длине соединяемых элементов неравномерно, что остаточные напряжения и деформации имеют максимальное значение посередине длины (рис. 11, в). Поэтому в соответствии с параболическим законом их распределения по длине можно принять

$$\epsilon_{1 \max} = \frac{1,5\Delta}{l}; \quad \epsilon_{2 \max} = \frac{1,5\Delta}{l}.$$

При отсутствии изгибающих моментов остаточные напряжения при охлаждении пластин находят по формулам (34) и (35).

Напряжения от момента M в паяном соединении (рис. 11, г) определяют по формуле

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{1 \max} F_1 \left(\frac{S_1}{2} + \frac{S_2}{2} \right)}{W}, \quad (40)$$

где W — момент сопротивления, равный $\frac{(S_1 + S_2)^2 b}{6}$.

Суммарные остаточные напряжения должны быть найдены сложением напряжений, определенных по формулам (34) и (35), с напряжениями, вычисленными по формуле (40).

При $S_1 = S_2 = S$ и $F_1 = F_2$ собственные напряжения от продольного сужения

$$\sigma_{1 \max} = \frac{1,5\Delta \frac{E_1}{l}}{1 + \frac{2E_1}{E_2}}. \quad (41)$$

Собственные напряжения от момента

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{1 \max} b S \cdot \left(\frac{S}{2} + \frac{S}{2} \right)}{(2\delta)^2 b/6} = \frac{3}{2} \sigma_{1 \max}. \quad (42)$$

Эпюра суммарных напряжений приведена на рис. 11, *д*.

Деформация элементов показана на рис. 11, *е*.

В паяных конструкциях, как и в сварных, возможно образование остаточных деформаций, вызывающих продольные и поперечные усадки — сокращение элементов или деформации изгиба, сопровождаемые искривлением элементов. В большинстве случаев деформации при пайке меньше по величине, чем при сварке, и лишь при пайке разнородных материалов они могут оказаться значительными.

В паяных деталях с разнородными физико-механическими свойствами металлов устранение собственных напряжений обычными способами, например термическим высоким отпуском, невозможно. При остывании и неоднородном протекании деформаций в элементах с разными свойствами в них неизбежно накапливание упруго-пластических деформаций, которые сопровождаются образованием собственных напряжений.

Пример. Определить собственные напряжения, образующиеся при пайке двух пластин; пластины 1 из низколегированной стали с пластиной 2 из аустенитной (типа 12Х18Н9).

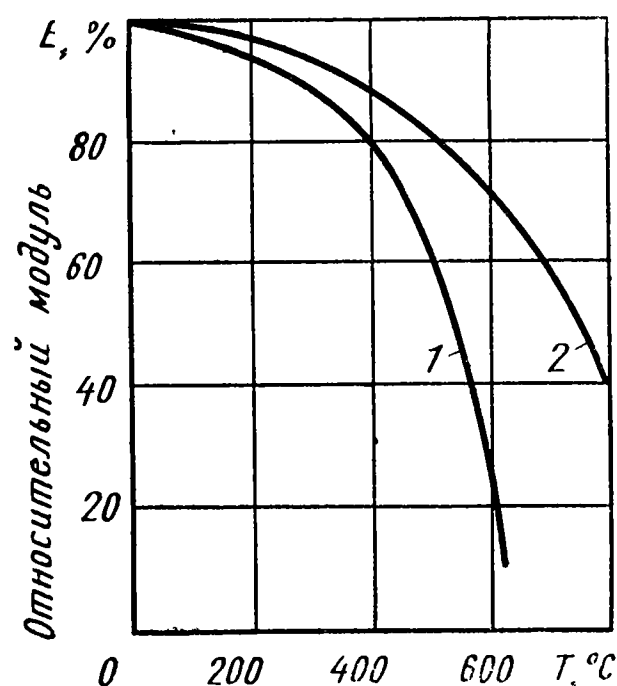


Рис. 12. Изменение относительного модуля упругости E в функции T

и $\varepsilon_{2 \max}$ на средние значения модулей упругости в процессе охлаждения пластин от $T = 700^\circ \text{C}$ до комнатной температуры:

$$E_{1cp} = (0 + 0,30 + 0,60 + 0,80 + 0,90 + 0,95 + 0,98) \cdot \frac{E}{7} = 0,65E;$$

$$E_{2cp} = (0,60 + 0,72 + 0,82 + 0,88 + 0,94 + 0,96 + 0,98) \cdot \frac{E}{7} = 0,84E.$$

Наибольшее остаточное напряжение от продольного сокращения в пластине 1 определим по формуле (36):

$$\sigma_{1 \max} = \frac{1,5 \cdot 0,346 \cdot 10^{-2} \cdot 0,65 \cdot 2,1 \cdot 10^6}{1 + \frac{2 \cdot 0,65 \cdot 10^6}{0,84 \cdot 10^6}} = 2776 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}.$$

Учитывая $F_1 = F_2 = F$, получаем

$$\sigma_{2 \max} = \sigma_{1 \max} = 2775 \text{ кгс/см}^2.$$

Если пределы текучести меньше указанных значений, то это показывает, что напряжение достигает предела текучести.

В пластине 1 остаточные напряжения растягивающие, в пластине 2 сжимающие и приближаются к пределу текучести.

Пластины паяют припоем при $T_1 = T_2 = 740^\circ \text{C}$ (1013°K). Длина пластин $l = 1 \text{ м}$. Площади поперечных сечений $F_1 = F_2 = F$. Температурный коэффициент линейного расширения: для пластины 1 в рассматриваемом интервале температур $\alpha_1 = 14,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ \text{C}$, для пластины 2 $\alpha_2 = 19,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ \text{C}$.

Изменение относительных величин модулей упругости E_1 и E_2 для пластин 1 и 2 в функции температуры приведено на рис. 12. При T_0 модуль $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$.

Свободные сокращения пластины 1 при ее остывании до $T = 20^\circ \text{C}$

$$\delta_1 = \alpha_1 (T_1 - T_0) l = 14,1 \cdot 10^{-6} (720 - 20) l.$$

Свободное сокращение пластины 2

$$\delta_2 = \alpha_2 (T_2 - T_0) l = 19,0 \cdot 10^{-6} (740 - 20) l.$$

Разность свободных сокращений

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = (1,368 - 1,022) \cdot 10^{-2} l = 0,346 \cdot 10^{-2} l.$$

Принимаем, что распределение упругих деформаций по длине пластины подчиняется закону квадратной параболы.

Чтобы определить остаточные напряжения, необходимо умножить относительные деформации $\varepsilon_1 \max$

Снижение остаточных напряжений в случае соединений, например, пластины из твердого сплава со стальным корпусом, температурные коэффициенты линейного расширения которых различны, достигается или применением припоев со сравнительно низкой температурой плавления, или увеличением толщины шва.

При применении легкоплавких серебряных припоев в результате снижения температуры пайки при охлаждении относительный сдвиг между корпусом инструмента и пластинкой твердого сплава уменьшается. В результате остаточные напряжения уменьшаются. Однако недостатком этого способа снижения остаточных напряжений являются низкая теплостойкость инструмента и высокая стоимость.

При увеличении толщины слоя припоя в паяном шве собственные напряжения распределяются по большей толщине и, следовательно, имеют меньшее значение. Однако следует учитывать, что увеличение зазора ведет к снижению прочности паяного соединения. Чтобы этого избежать, толщину слоя припоя увеличивают искусственно, помещая в зазор между соединяемыми пайкой поверхностями деталей компенсационные прокладки из железной, медной и никелевой фольги или сетку толщиной 0,4 мм. Лучше применять для этой цели железо-никелевый сплав пермаллой, содержащий 45% Ni. Применение компенсационных прокладок в 1,5 раза повысило прочность твердосплавного паяного инструмента, что позволило производить его закалку после пайки, когда нужно повысить механические свойства стального корпуса.

Остаточные напряжения при пайке были изучены экспериментально в МВТУ им. Н. Э. Баумана на образцах из низкоуглеродистой стали. На пластины из стали Ст3 делали напайки вдоль оси и по кромкам. Для сопоставления на такие же пластины направляли шов дуговой ручной сваркой. Пайку выполняли газовыми горелками припоем Л62. Длина пластин 400 мм, ширина 120 мм, толщина 10 мм.

Результаты испытаний показали, что в зоне пайки и наплавки на кромке пластины образуются собственные напряжения (~ 15 кгс/мм²), величина которых резко уменьшается по мере удаления от шва, меняя свой знак. На противоположной стороне пластины образуются напряжения растяжения.

В зависимости от соотношений между температурными коэффициентами линейного расширения и теплопроводности собственные напряжения, вызванные пайкой, изменяются в широких пределах. В ряде случаев они достигают значений предела текучести металла шва.

Собственные напряжения вызывают в паяных конструкциях, так же как и в сварных, остаточные деформации. В МВТУ им. Н. Э. Баумана производили измерения остаточных деформаций при укладке паяных и сварных швов по осям и кромкам пластин из стали Ст3 с размерами, указанными выше. При этом в зоне паяных швов образуется укорочение волокон, которое составляет 40—60% от укорочения волокон при наплавках ручной дуговой сваркой. По-видимому, это объясняется более равномерным распределением температуры при пайке по сечению пластины, в результате чего сокращается зона пластических деформаций и уменьшается величина усадочных усилий, определяющих величины остаточных напряжений.

Величина остаточных деформаций при пайке в большой степени зависит от соотношения между физико-механическими свойствами паяных швов и основного металла. При укладке паяных швов на многие сорта не только низкоуглеродистых, но и конструкционных низколегированных сталей в зоне паяных швов возникают собственные напряжения растяжения. При этом паяная конструкция деформируется аналогично сварной. В ней возникают деформации укорочения размеров при симметричных положениях швов и деформации изгиба при несимметричных. В зоне швов, как правило, возникают продольные деформации укорочения. При пайке в печах, соляных ваннах изделия нагреваются и остывают более равномерно, чем при использовании газовой горелки. Поэтому собственные напряжения в конструкциях при указанных методах пайки и остаточные деформации имеют меньшую величину.

Помимо общих остаточных деформаций в паяных конструкциях, так же как и в сварных, возможно образование местных остаточных деформаций в зоне соединений встык, внахлестку, втавр и т. д. В большинстве случаев локальные остаточные деформации при пайке незначительны, за исключением тех, которые возникают в изделиях весьма малой толщины, подвергаемых при пайке неравномерному нагреву.

Для уменьшения остаточных деформаций паяных конструкций следует применять присадочный металл, возможно более близкий по своим физическим свойствам к основному; использовать пайку с равномерным нагревом; возможно уменьшить погонную энергию в шве при пайке горелками, применять механическую правку конструкций.

ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Прочность паяных соединений зависит от свойств основного и присадочного металла, флюсов, технологического процесса пайки. Припой не должен, взаимодействуя с соединяемыми металлами, образовывать хрупкие фазы.

Прочность паяных швов встык зависит от величины зазора и в некоторой степени от площади спая. В случаях, когда прочность основного металла превышает прочность припоя, наилучшие результаты достигаются при минимальном зазоре, однако при полном заполнении шва припоем. Уменьшение зазора, приводящее к смыканию контактируемых плоскостей, препятствует растеканию припоя, в результате чего понижается прочность соединения.

На рис. 13 даны значения пределов прочности соединений из армко-железа, паянных медью, в

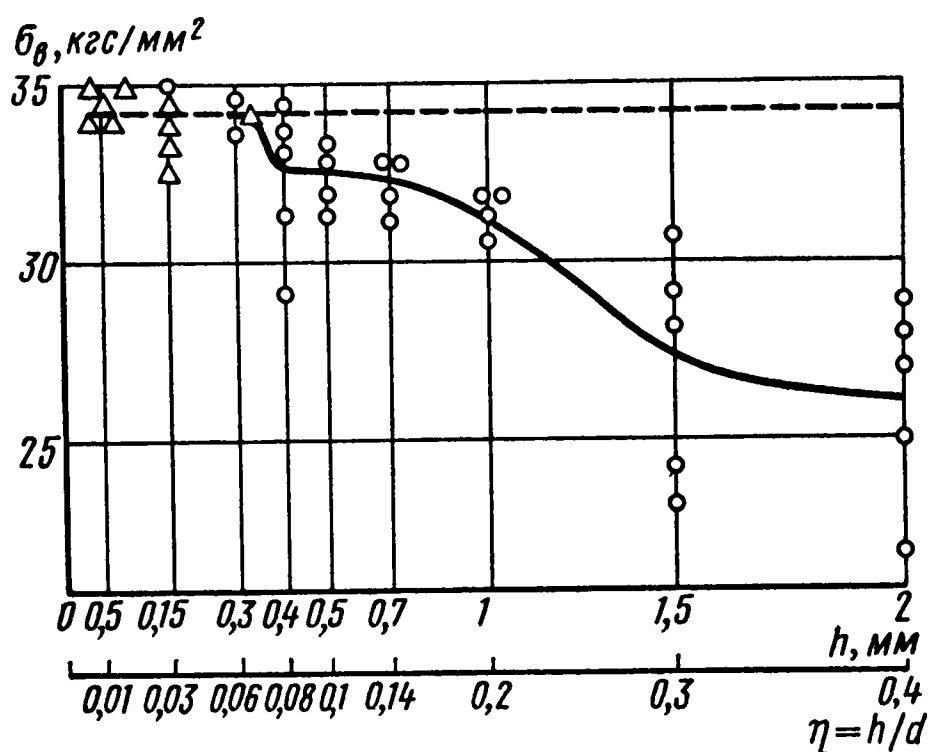


Рис. 13. Зависимость прочности соединений из армко-железа, паянных медью, от ширины зазора:

○ — разрыв по шву; △ — разрыв по железу

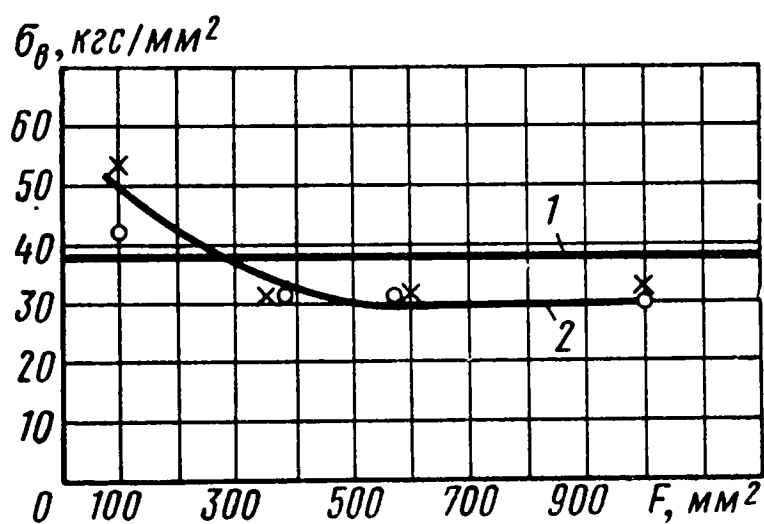


Рис. 14. Зависимость предела прочности паяных соединений от площади шва: кривая 1 — прочность припоя; кривая 2 — прочность соединения

зависимости от величины зазора и от отношения зазора к диаметру испытуемых образцов. Штриховой линией показан предел прочности армко-железа.

На рис. 14 показана зависимость предела прочности паяных соединений от площади шва.

Величина пределов прочности паяных соединений в зависимости от механических свойств основного металла — высокопрочных сталей приведена на рис. 15. Пайка производилась припоем, содержащим 40% серебра. На рис. 16 показаны значения пределов прочности соединений из сталей марки 45, термообработанных при разных режимах, паянных медью при зазоре 0,1 мм.

Прочность паяных швов внахлестку также зависит в значительной мере от величины зазора. На рис. 17 даны значения величин пределов прочности на срез паяных швов образцов из низкоуглеродистой стали (кривая 3), латуни (кривая 2) и меди (кривая 1), паянных припоями Sn + Pb при зазорах от 0,02 до 0,15 мм [3]. На рис. 18 приведены те же зависимости при пайке сталей марки 45 и Ст3 припоями ПСр 45 [3].

На рис. 19 даны величины разрушающих напряжений среза в соединениях вала с кольцом в зависимости от размеров зазора. Основной металл образцов — низкоуглеродистая сталь. Ломаные линии соответствуют результатам испытаний при разных припоях. Каждому виду припоя соответствует свое значение оптимального зазора.

На рис. 20 приведена зависимость прочности соединений мягких сталей толщиной $\delta = 5$ мм, паянных припоями Cu + Zn с содержанием кремния от 0,11 до 0,25%.

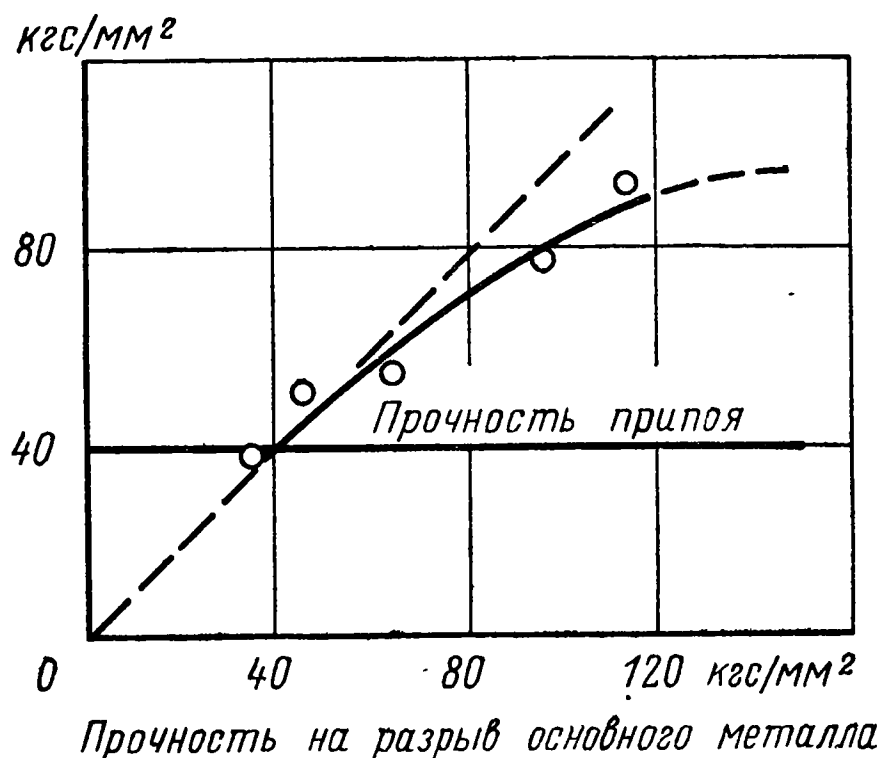


Рис. 15. Зависимость прочности паяных соединений от механических свойств основного металла — высокопрочной стали

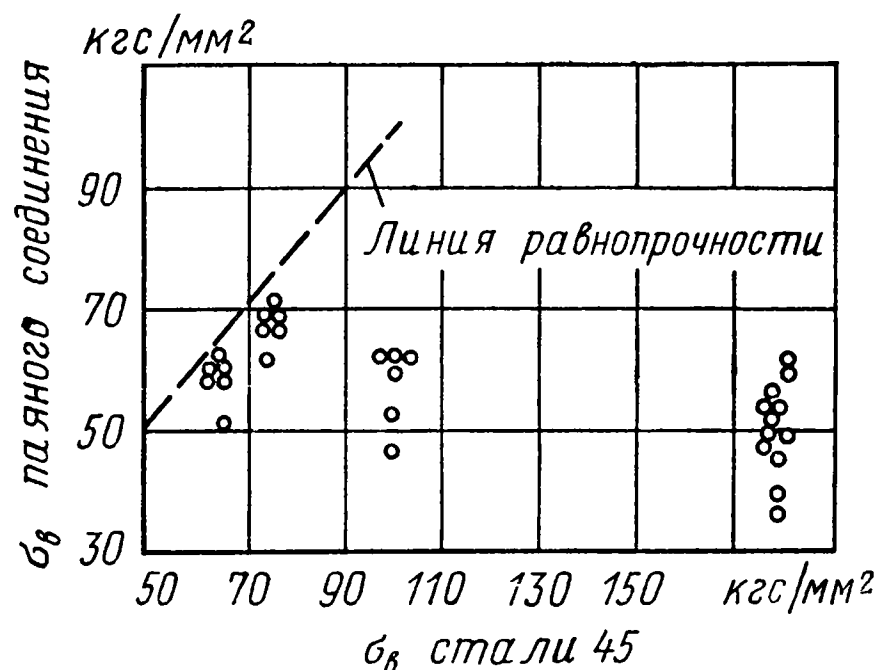


Рис. 16. Прочность соединений из стали 45, термообработанных при разных режимах

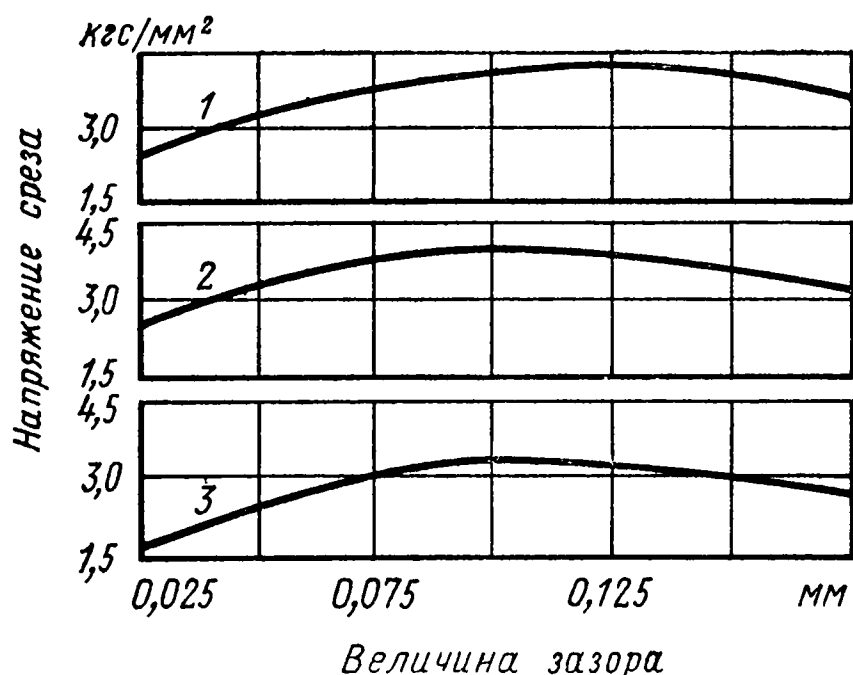


Рис. 17. Зависимость прочности на срез от величины зазора

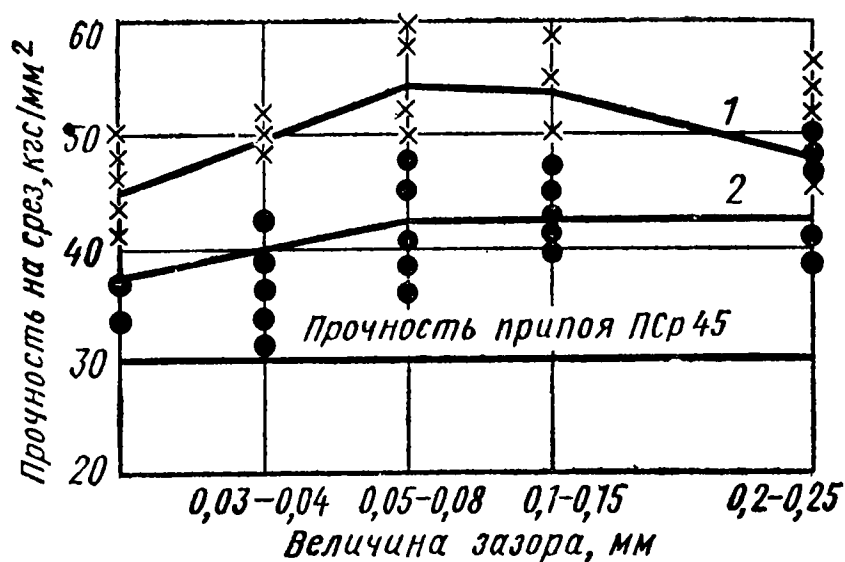


Рис. 18. Зависимость прочности на срез от величины зазора (припой ПСр 45): кривая 1 — сталь 45; кривая 2 — сталь Ст3

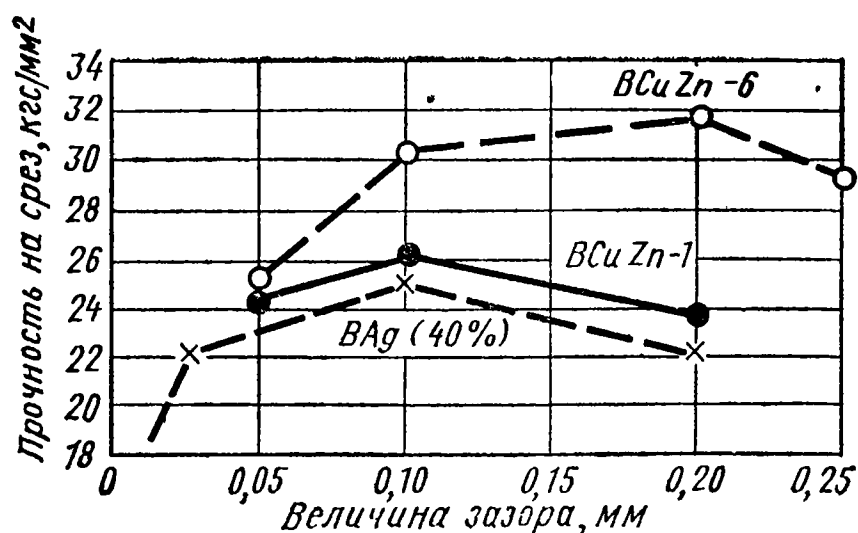


Рис. 19. Прочность телескопических соединений на срез

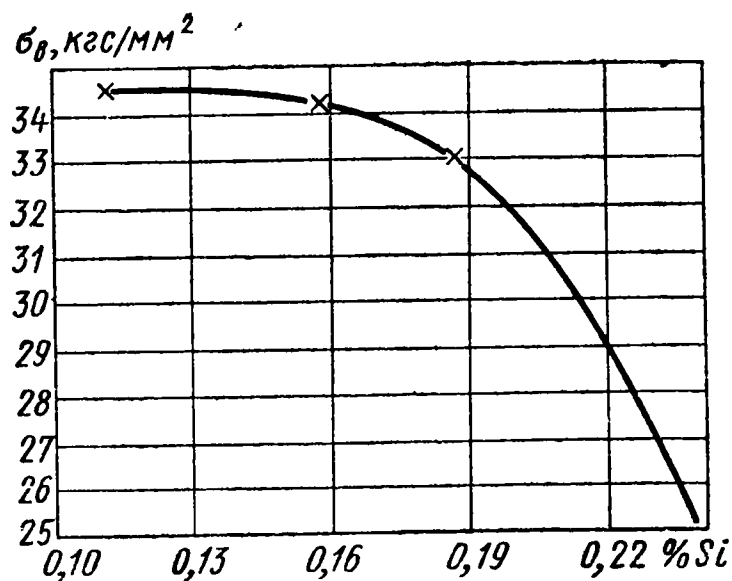


Рис. 20. Зависимость прочности соединений из мягкой стали толщиной $\delta = 5$ мм от содержания кремния в припоях Cu—Zn

Вопрос о влиянии качества обработки поверхности на прочность паяных соединений является дискуссионным. По данным Колбуса и Мюллера, гладкая поверхность образцов обеспечивает более высокие механические свойства паяных соединений, чем шероховатая. Имеются противоположные данные. По результатам некоторых советских исследователей, шероховатость поверхности и насечки, нанесенные на нее, способствуют повышению механических свойств паяных соединений.

В табл. 2—4 приведены пределы прочности паяных соединений из разных металлов и сплавов, паянных серебром и другими припоями разного состава, работающих на срез. В табл. 3 и 4 даны значения пределов прочности на срез паяных швов при разных температурах испытаний.

2. Значения предела прочности на срез паяных соединений при повышенных температурах

Марка припоя	Основной металл	Предел прочности в кгс/мм² при температуре, °С			
		200	300	400	600
ПСр 45	12Х18Н9Т	—	16—24	14,5—15	3—4
ПСр 40	15Х18Н12С4ТЮ	22—32	15—17	5—9	—
ПСр 37,5	12Х18Н9Т	—	31—35	—	11—18

3. Значения предела прочности на срез соединений, паянных жаропрочными припоями, при различных температурах испытания

Марка припоя	Основной металл	Предел прочности в кгс/мм² при температуре, °С					
		—60	20	200	400	500	600
ВПр1	12Х18Н9Т	43—58	37—50	30—40	19—22	—	9—16
ВПр1	09Х15Н9Ю (СН-2)	25—30	21—30	20—30	19—24	12—20	—
ВПр1	10Х17Н5М3 (СН-3)	19—22	21—25	19—23	21—25	9—13	—

4. Значения пределов прочности соединений, паянных серебряными припоями

Основной металл	Предел прочности на срез, кгс/мм²		
	ПСр 40	ПСр 45	ПСр 25КН
12Х18Н9Т	24—29	18—26	19—24
40ХНМА	33—46	—	—
30ХГСА	35—46	35—41	35—43
Медь	25	25	25

5. Значения предела прочности на срез соединений, паянных оловянно-свинцовым припоем ПОС 40

Основной металл	Предел прочности, кгс/мм², при температуре испытания, °С					
	—196	—183	—96	—60	+20	+85
Медь М3	3,5	3,3	3,4	3,5	2,7	1,6
Латунь Л63	2,9	2,9	3,1	2,7	2,2	2,2
Сталь 12Х18Н9Т	3,0	3,4	3,0	5,0	3,2	2,0

В табл. 5 приведены данные пределов прочности паяных соединений внахлестку из цветных сплавов и сталей, работающих при низких температурах.

На рис. 21 и 22 показаны полученные Бредзом экспериментальные зависимости прочности стыковых образцов из инструментальной и низкоуглеродистой стали, паянных чистыми серебром и медью [10]. Из этих рисунков следует, что с уменьшением толщины шва прочность соединения возрастает, максимальная прочность достигается при зазорах, меньших 0,1 мм.

Эксперименты Лича при пайке нержавеющей стали серебряным, кадмиевым и цинковым припоями показали, что прочность на разрыв увеличивается по мере уменьшения толщины паяного шва [12]. Снижение предела прочности паяного соединения с очень малым зазором объясняется дефектами в шве [1].

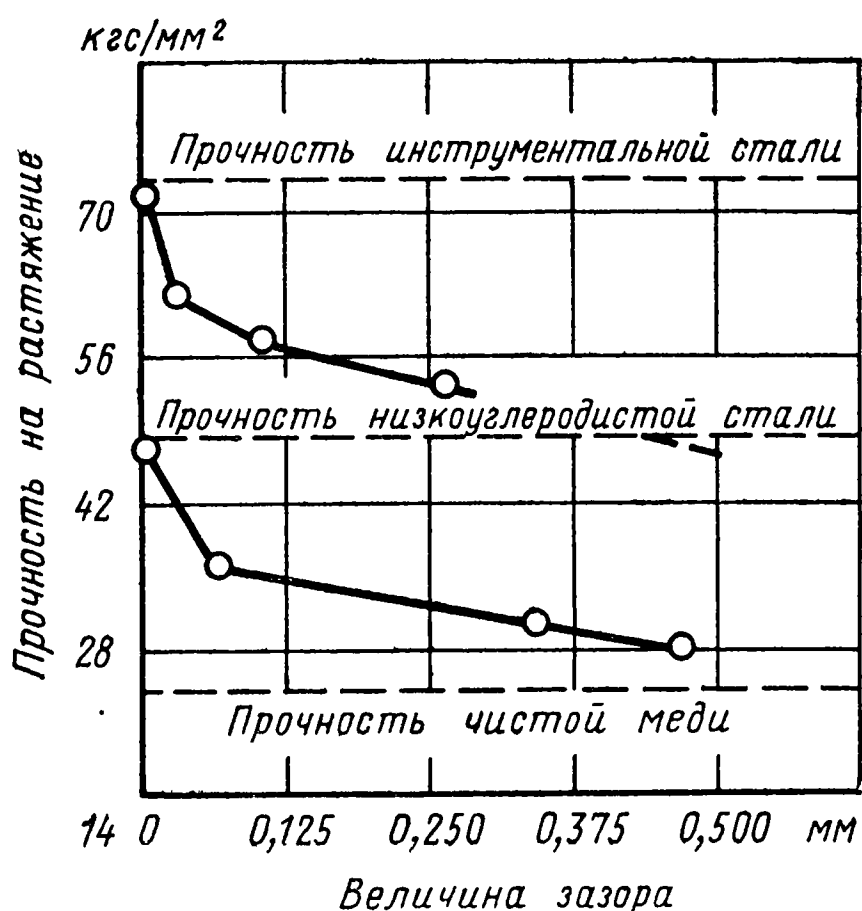


Рис. 21. Зависимость прочности паяных соединений встык от величины зазора (припой — медь)

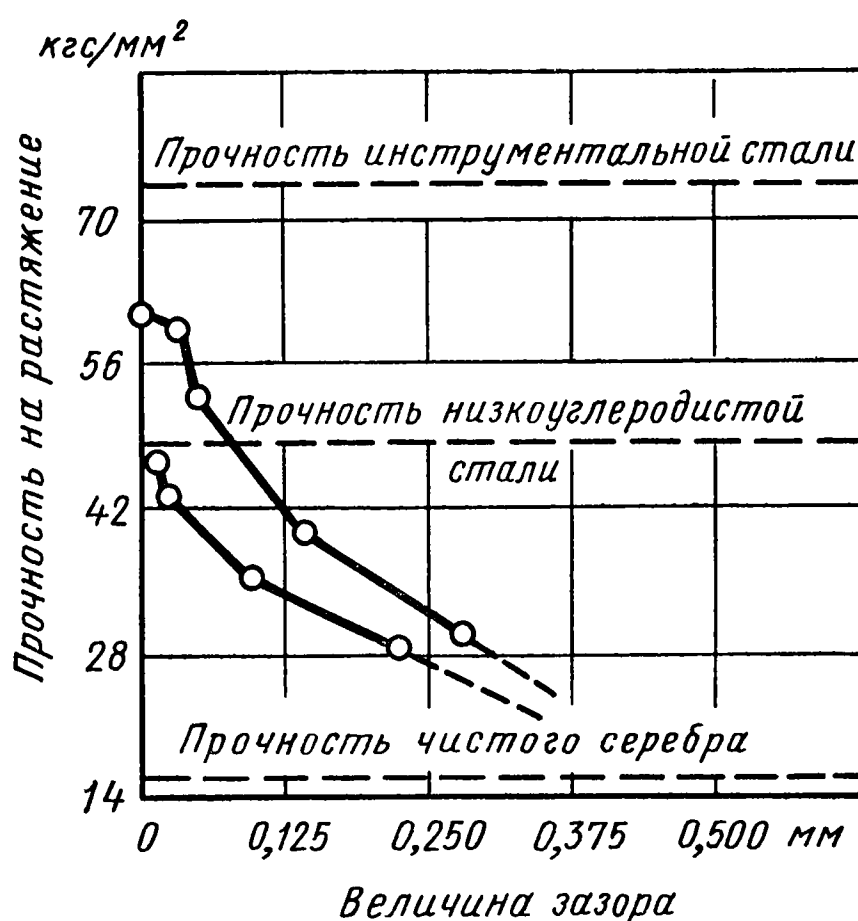


Рис. 22. Зависимость прочности паяных соединений встык от величины зазора (припой — серебро)

Исследования Ёсиды [1] показали, что толщина шва влияет на прочность соединения при различных нагрузках.

Пайка образцов из низкоуглеродистой стали (с содержанием углерода 0,4%) толщиной листа 10 мм производилась медно-цинковым сплавом Л70 в печи с температурой 1000° С, флюс — плавная бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Зазор паяного шва составлял 0,03; 0,07; 0,12; 0,15; 0,20 мм.

При испытании на разрыв образец имел размеры 12,5 × 9,0 × 160 мм, при испытаниях на изгиб 25 × 100 мм. При испытаниях на усталость прочность определялась при изгибе с вращением.

Образец с размерами 38 × 5 × 90 мм подвергался воздействию знакопеременной нагрузки. Схема испытаний образцов представлена на рис. 23.

Данные экспериментов Ёсиды приведены на рис. 24.

Результаты испытаний образцов из низкоуглеродистой стали, проведенных Брукером и Битсоном [11] (пайка производилась медным, цинковым, кадмиевым, никелевым припоями), свидетельствуют о том, что при изменении ширины зоны сплавления прочность на разрыв остается неизменной. Но следует отметить, что в этом случае прочность припоя и прочность основного металла (низкоуглеродистой стали) практически одинаковы (~ 42 кгс/мм²).

В работе [8] описывается диффузионная пайка сплава ОТ4 с применением промежуточных гальванопокрытий в температурном интервале 890—1000° С и при различных выдержках. Максимальная прочность может быть получена при толщине гальванопокрытий 6—9 мкм. Результаты исследований приведены в табл. 6.

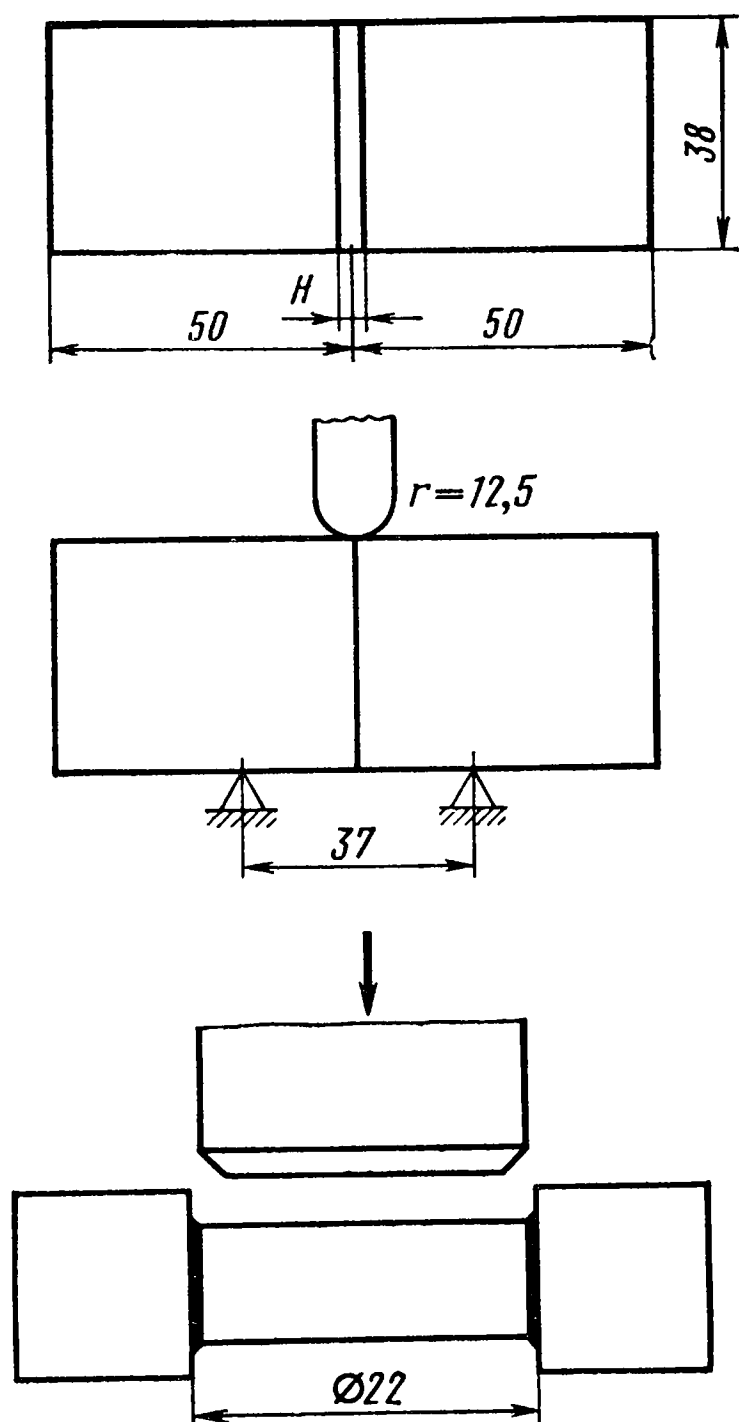


Рис. 23. Схема испытаний паяных образцов на изгиб и срез

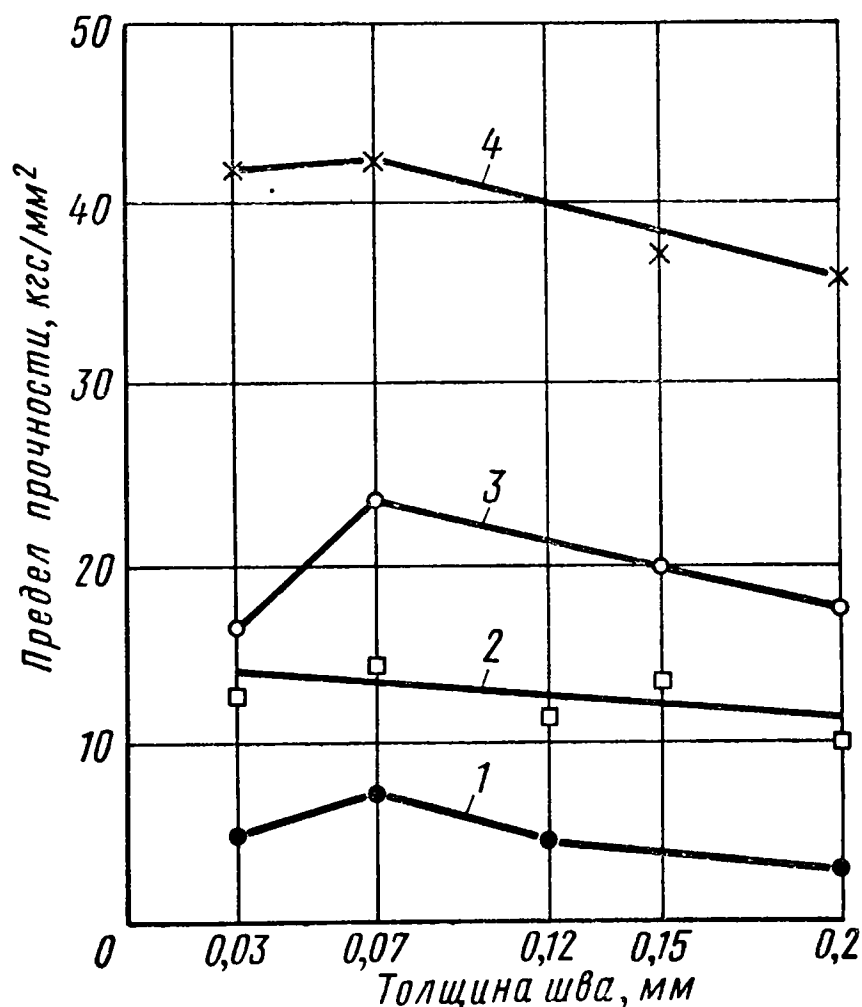


Рис. 24. Зависимость прочности паяных соединений от толщины шва:

1 — усталостная прочность; 2 — предел прочности на срез; 3 — предел прочности на разрыв; 4 — предел прочности на изгиб

В табл. 7 приведены значения пределов прочности на срез паяных соединений некоторых сплавов титана, выполненных с использованием различных припоев [13].

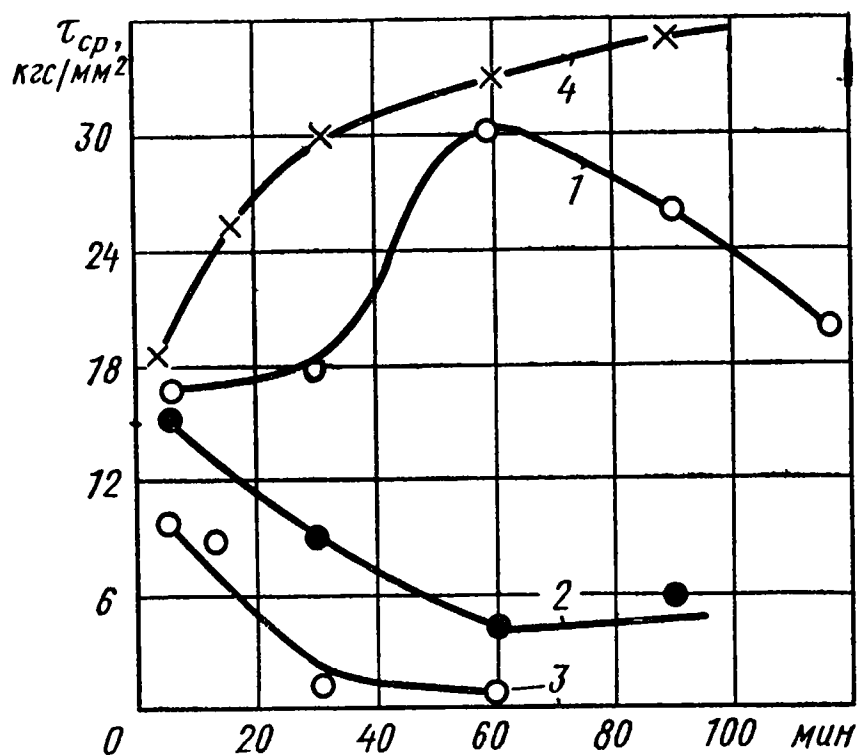


Рис. 25. Зависимость прочности паяных соединений из сплава ОТ4 от температуры пайки и времени выдержки

б — припой содержит 33% Cu (кривая 1 — $T = 1050^\circ \text{C}$; кривая 2 — $T = 960^\circ \text{C}$).

Черными точками обозначены средние значения сопротивления срезу для пяти образцов, паянных с применением давления.

В качестве образцов применяли соединяемые внахлестку ($l = 5$ мм) пластинки шириной 16 мм, толщиной от 1 до 2 мм. Пайка производилась в муфельной печи в среде аргона.

На рис. 25 показаны результаты испытаний на срез соединений из сплава ОТ4, паянных в среде проточного аргона, в зависимости от температуры и времени пайки [2]. Кривая 1 — образцы паялись припоем ПСр 85—15 при $T = 1000^\circ \text{C}$; кривая 2 — то же, при $T = 1050^\circ \text{C}$; кривая 3 — то же, при $T = 1150^\circ \text{C}$; кривая 4 — пайка серебром при 1000°C . На рис. 26 показано влияние давления при диффузионной пайке соединений из сплава ОТ4. Образцы паялись в вакууме (10^{-4} мм рт. ст.): а — припой содержит 28,5% Ti (кривая 1 — $T = 1050^\circ \text{C}$; кривая 2 — $T = 960^\circ \text{C}$);

Для пайки тугоплавких металлов применяют кремний-ниобиевые припои, при этом в соединении достигается прочность основного металла. Припои могут быть изготовлены в виде проволок, листов, порошка. Пайку ведут в среде водорода с продувкой гелием.

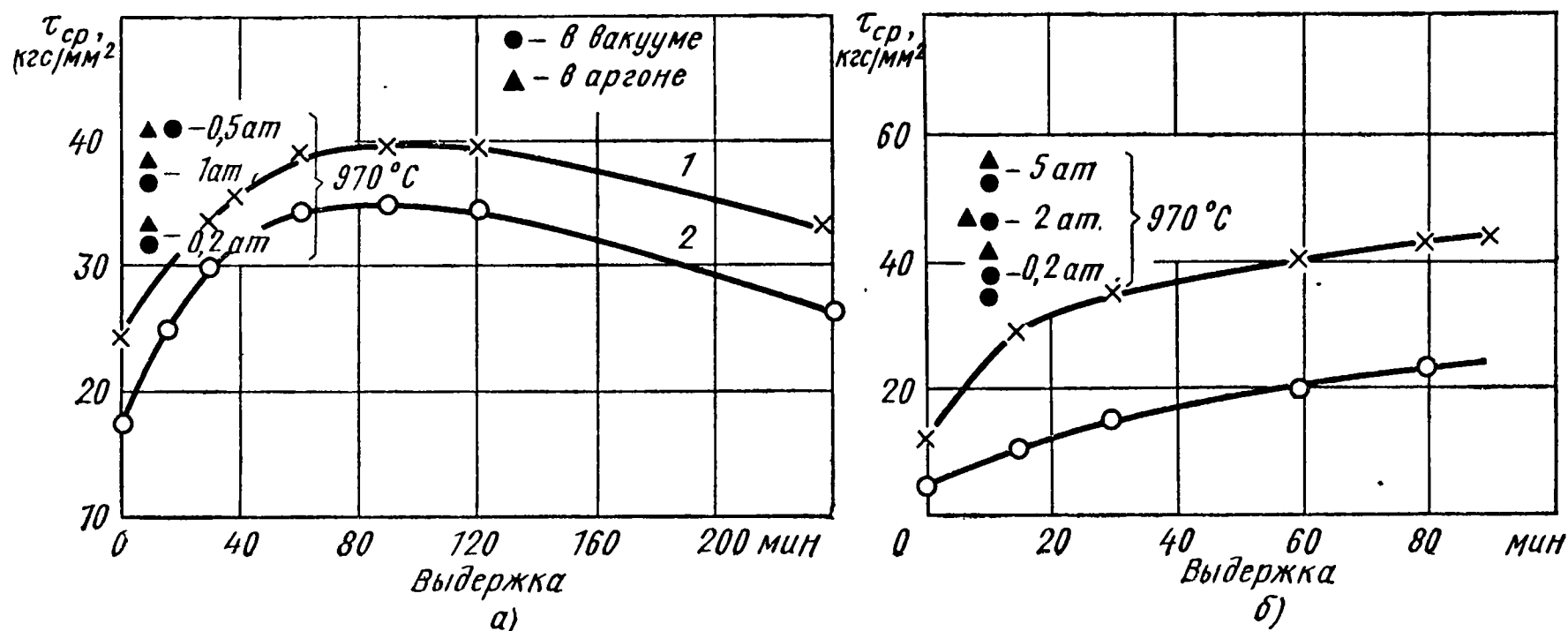


Рис. 26. Влияние давления на прочность при диффузионной пайке соединений из сплава ОТ4

Температура пайки зависит от содержания в припое кремния. Например, если кремния 7%, то $T = 2000^\circ \text{C}$; при 4% — 2250°C ; при 2% — 2350°C ; при 0,5% — 2400°C (остальной материал припоя — ниобий)

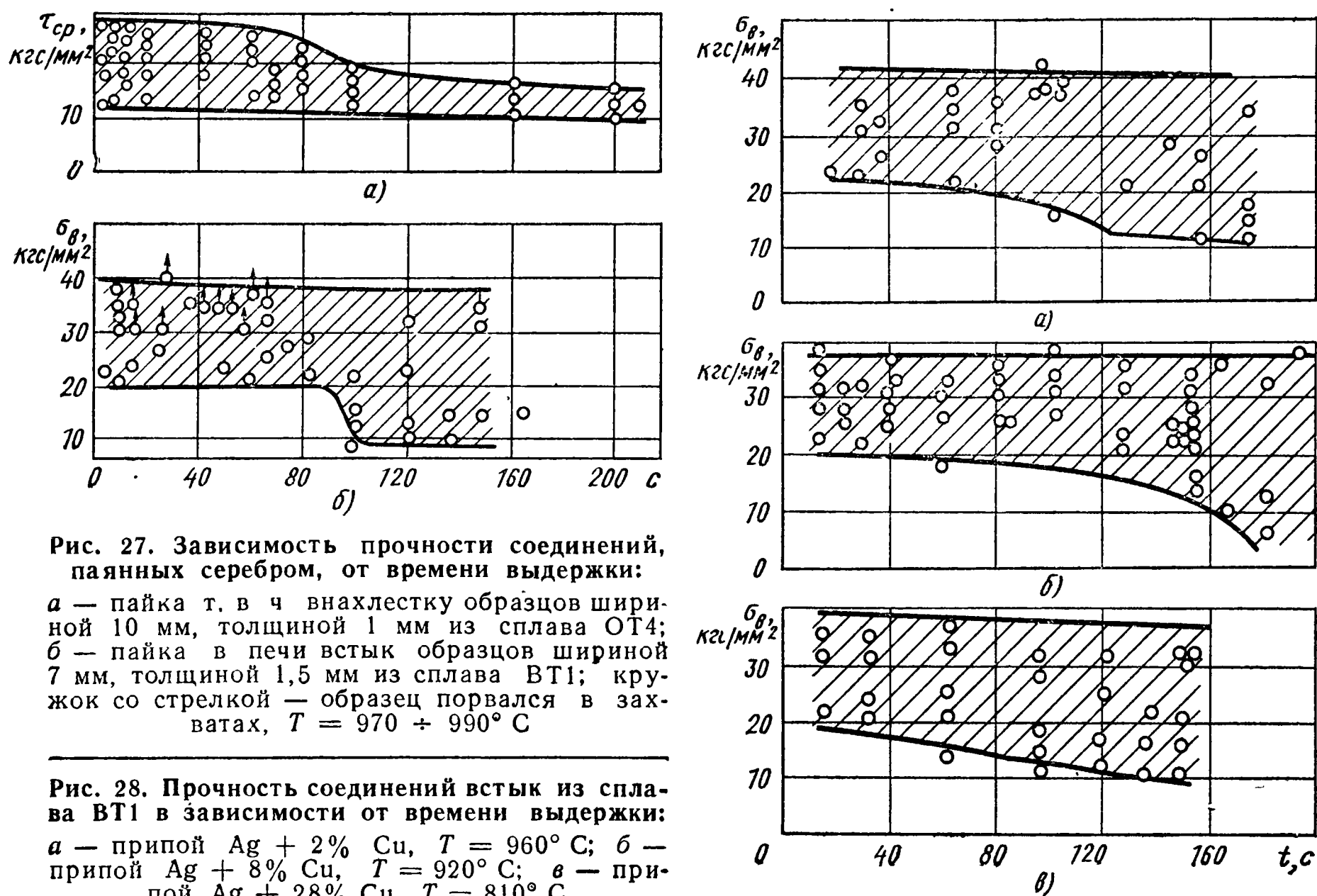


Рис. 27. Зависимость прочности соединений, паянных серебром, от времени выдержки:

а — пайка т. в ч. внахлестку образцов шириной 10 мм, толщиной 1 мм из сплава ОТ4; б — пайка в печи встык образцов шириной 7 мм, толщиной 1,5 мм из сплава ВТ1; кружок со стрелкой — образец порвался в захватах, $T = 970 \pm 990^\circ \text{C}$

Рис. 28. Прочность соединений встык из сплава ВТ1 в зависимости от времени выдержки:

а — припой $\text{Ag} + 2\% \text{Cu}$, $T = 960^\circ \text{C}$; б — припой $\text{Ag} + 8\% \text{Cu}$, $T = 920^\circ \text{C}$; в — припой $\text{Ag} + 28\% \text{Cu}$, $T = 810^\circ \text{C}$

На рис. 27 показана зависимость прочности соединений, паянных серебром, от времени выдержки с момента заполнения припоем зазора [7].

На рис. 28 показана прочность стыковых соединений из сплава ВТ1 в зависимости от времени выдержки с момента заполнения зазора.

6. Предел прочности паяных соединений в зависимости от времени выдержки при различной толщине покрытий

Температура пайки, °С	Время выдержки, мин	Прочность паяного шва из сплава ОТ4 для различных покрытий, кгс/мм²		
		Cu	Cu—Ni—Cu	Cu—(Co—Ni)—Cu
890	30	8,5—9,6	9,2—10,3	9,8—11,2
900	30	7,9—9,7	9,5—13,1	9,8—14,8
910	30	8,7—10,2	9,7—14,4	10,3—15,7
910	60	9,3—16	11,2—17,5	12,7—18,9
920	30	10,4—17,3	12,6—18,7	14,2—19,1
920	60	11—17,7	14—19,2	14,7—19,8
930	30	12—18	15—20	15—20
930	60	12—18	16—21	17—22
940	30	18—19	23—28	37—40
940	60	18—21	27—32	37—41
950	15	15—20	24—29	48—53
950	30	16—20	28—32	55—63
950	45	18—21	29—33	42—51
950	60	19—22	27—29	37—40
960	15	26—23	38—42	67—75
960	30	25—26	30—31	40—53
960	45	22—23	28—29	36—38
960	60	20—21	25—27	30—32
970	15	26—29	40—43	65—69
970	30	20—23	28—29	31—32
980	15	20—21	25—28	26—30
990	15	19—20	25—27	25—29
1000	15	15—16	20—21	20—21

7. Пределы прочности на срез паяных соединений из сплавов титана

Припой	Рабочая температура, °С	Предел прочности на срез, кгс/см², сплава титана, содержащего			
		13% V; 11% Cr; 3% Al	8% Al, 1% Mo, 1% V	5% Al, 2,5% Sn	6% Al, 4% V
		δ = 1,6 мм	δ = 1,63 мм	δ = 1,65 мм	δ = 1,42 мм
Ag—Li	790	1,6	3,2—7,2	9,8—13,3	10,6—11,5
Ag—Al	900	16,6—15,2	8,3	3,3—10,0	—
Ag—Cu	790	11,3	10,5—11,4	9,6—16,2	6,8—10,3
Ag—Cu	900	14,7—16,0	12,7—15,5	1,2—10,7	10,1—12,6
Ag—Cu—Sn	760	5,0—6,1	6,0—10,5	11,0	6,5
Ag—Cu—Sn	840	6,0—13,2	7,0—8,8	8,9—12,1	8,9—12,9

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Основными дефектами паяных соединений являются непропаи, возникающие из-за неправильного температурного режима, недостаточного затекания припоя в зазор в результате неправильной укладки перед пайкой или же недостаточного его количества; включения флюса; дефекты сцепления из-за плохой очистки спаиваемых поверхностей и несоблюдения требуемого зазора и т. д.

Изучение влияния внутренних дефектов на прочность соединений при статических нагрузках производилось на образцах из стали Ст3 при индукционном нагреве. Испытания проходили при комнатной температуре $+20^{\circ}\text{C}$ (рис. 29).

По оси абсцисс отложены проценты дефекта (непропая) по отношению ко всей зоне соединения, а по оси ординат — величина предела прочности, отнесенная к участку разрушения. Из рис. 29 следует, что прочность монотонно уменьшается с увеличением площади дефекта. Соединение выполнено внахлестку, длина которой равна двукратной толщине основного металла. В целом образце разрушающие напряжения по основному металлу составляли $\sim 40 \text{ кгс/мм}^2$, при непропае 50% разрушение наступало по месту спая при напряжении 35 кгс/мм^2 .

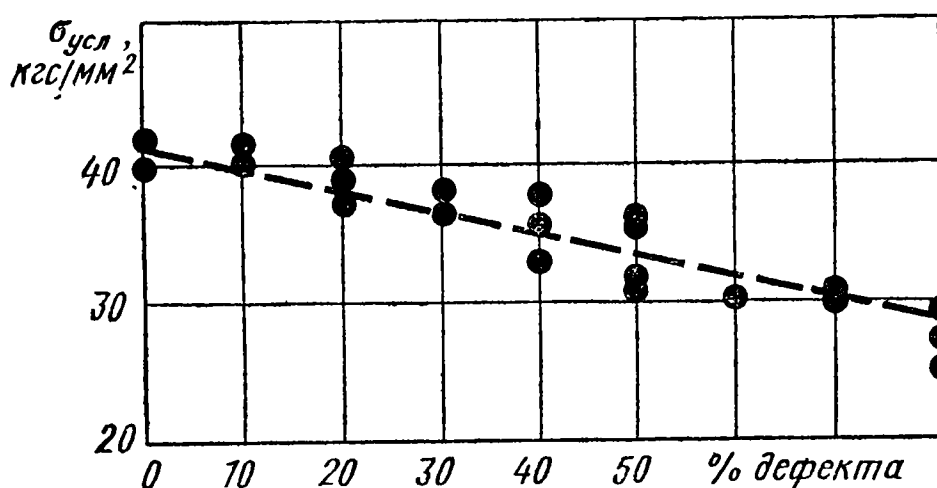


Рис. 29. Влияние внутренних дефектов на прочность паяных соединений при статической нагрузке

На рис. 30 приведены результаты испытаний образца с дефектом, выходящим наружу к галтели (образцы из стали 10, паяемые припоями Л62). Нагрев индукционный, температура испытаний $+20^{\circ}\text{C}$. Падение прочности с увеличением процента дефектов, выходящих к галтели, более интенсивно, чем в первом случае.

Результаты испытаний образцов с дефектом — внутренним непропаем — при статическом нагружении и низких температурах показали, что паяные соединения

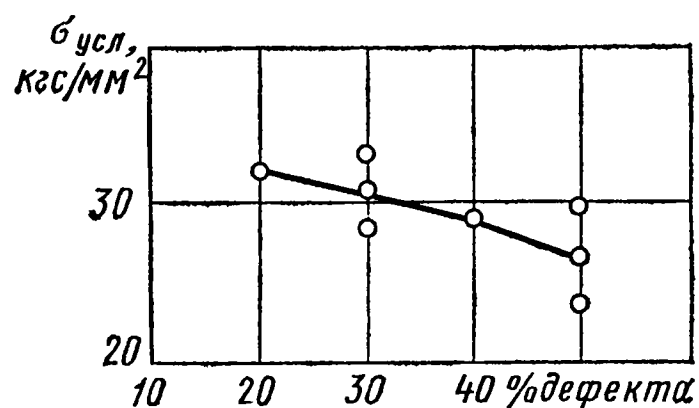


Рис. 30. Влияние дефектов, выходящих на поверхность, на прочность паяных соединений при статической нагрузке

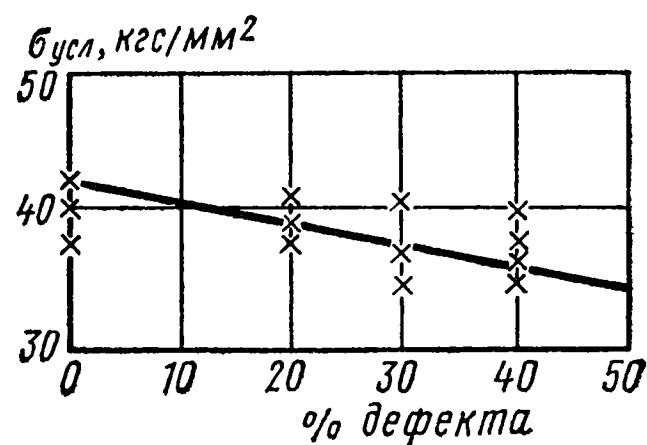


Рис. 31. Влияние внутренних дефектов на прочность паяных соединений при статическом нагружении и низких температурах

не обнаружили склонности к хрупким разрушениям (рис. 31). Материал образцов — сталь 10, припой Л62, образцы паяли газовой горелкой, температура испытаний -35°C .

В образцах без дефектов разрушения возникали при $\sigma = 41 \text{ кгс/мм}^2$, а при дефекте 50% — при 35 кгс/мм^2 . Разрушения происходили по зоне шва и по основному металлу. Испытания показали, что паяные соединения достаточно хорошо сопротивляются хрупким разрушениям даже при наличии в них ложнонапряженного состояния, вызванного непропаем и изгибающим моментом от внецентренно приложенных сил.

ПРОЧНОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Были проведены испытания образцов одинаковых размеров с припаянной или приваренной накладками угловыми лобовыми швами (рис. 32). Сварка проводилась электродами высокого качества, пайка — припоями Л63. Образцы были изготовлены

из низкоуглеродистой стали; нагружения — знакопеременные (симметричные циклы). Эксперименты показали, что паяные соединения более долговечны, чем сварные; при $\sigma = 12 \text{ кгс/мм}^2$ паяные соединения выдерживали миллион нагружений, сварные лишь $\sim 250\,000$.

Результаты испытания на долговечность паяных и сварных соединений при рабочих напряжениях показаны на рис. 33.

Проведенные испытания показали, что при воздействии знакопеременных и пульсирующих нагрузок паяные соединения из низкоуглеродистых сталей, рационально спроектированные, более долговечны, чем сварные. Это наблюдается как при связующих, так и при рабочих напряжениях в зонах соединений.

Как было показано выше, на концентрацию напряжений в паяных соединениях внахлестку сильное влияние оказывают толщина паяемых элементов и длина нахлестки. С увеличением толщины элементов

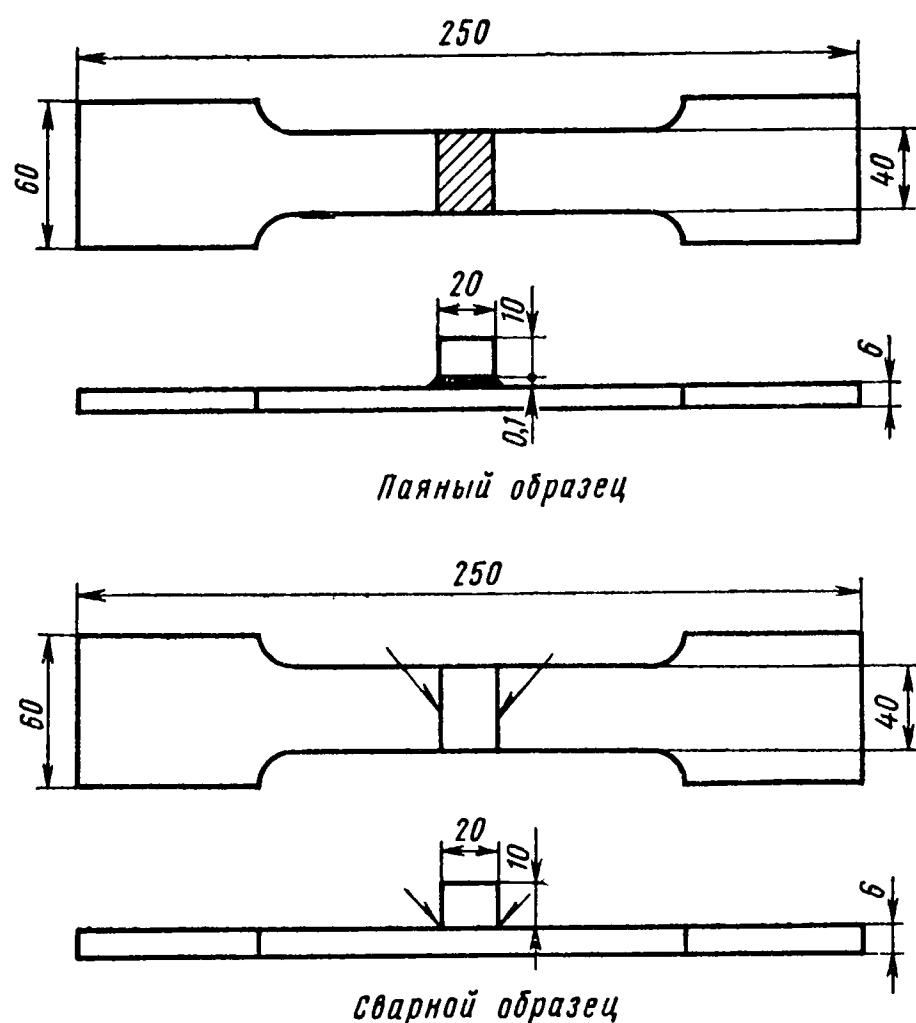


Рис. 32. Образцы для испытания при переменных нагрузках

и уменьшением длины нахлестки концентрация напряжений возрастает. Испытания паяных образцов из низкоуглеродистой стали СтЗсп показали, что с увеличением толщины паяемых элементов предел выносливости понижается

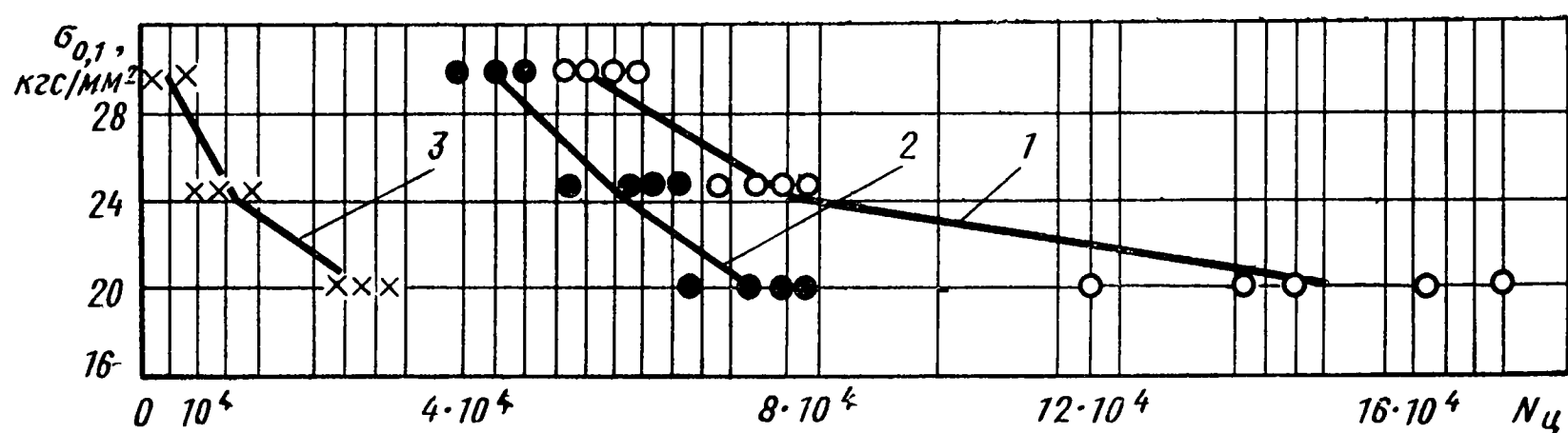


Рис. 33. Долговечность паяных и сварных соединений при пульсирующих нагрузках:

кривая 1 — паяные газовой горелкой образцы из стали СтЗ (припой Л63); кривая 2 — сварные образцы из стали СтЗ (швы, лобовые, $K = 5 \text{ мм}$); кривая 3 — сварные образцы из стали СтЗ (швы фланговые, $K = 5 \text{ мм}$)

(рис. 34). Для образцов толщиной 5 мм $\sigma_{0.1} = 6,7 \text{ кгс/мм}^2$ (кривая 1), для образцов 9 мм $\sigma_{0.1} = 4,9 \text{ кгс/мм}^2$ (кривая 2).

Увеличение длины нахлестки от 2δ до 3δ на образцах из стали СтЗсп толщиной δ = 5 мм повысило предел выносливости паяного соединения (рис. 35). При длине

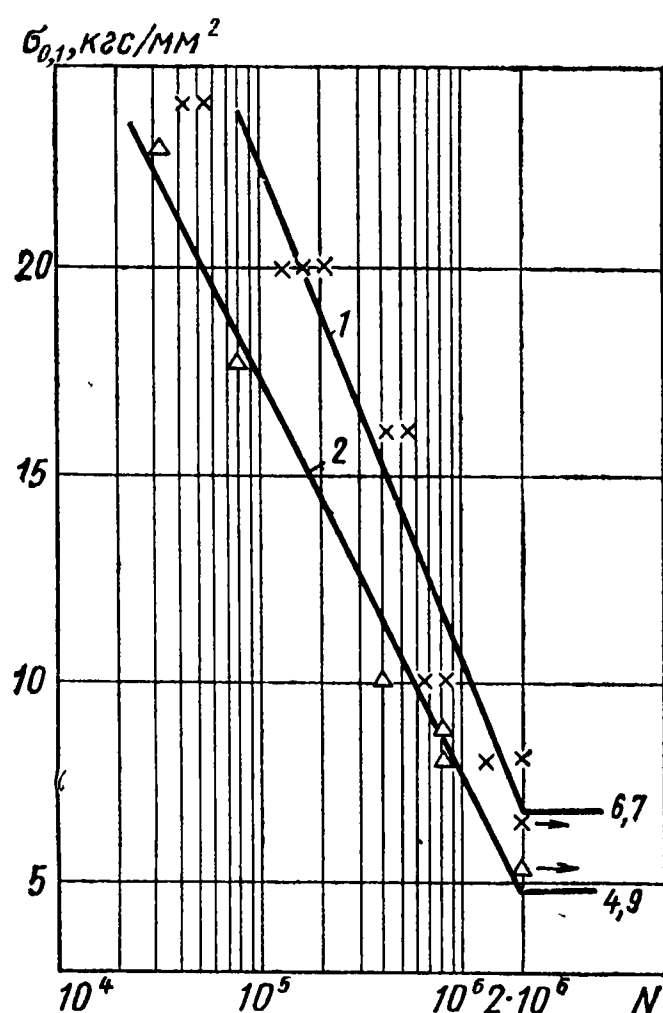


Рис. 34. Выносливость паяных соединений внахлестку:
кривая 1 — образцы толщиной $\delta = 5$ мм; кривая 2 — образцы толщиной $\delta = 9$ мм

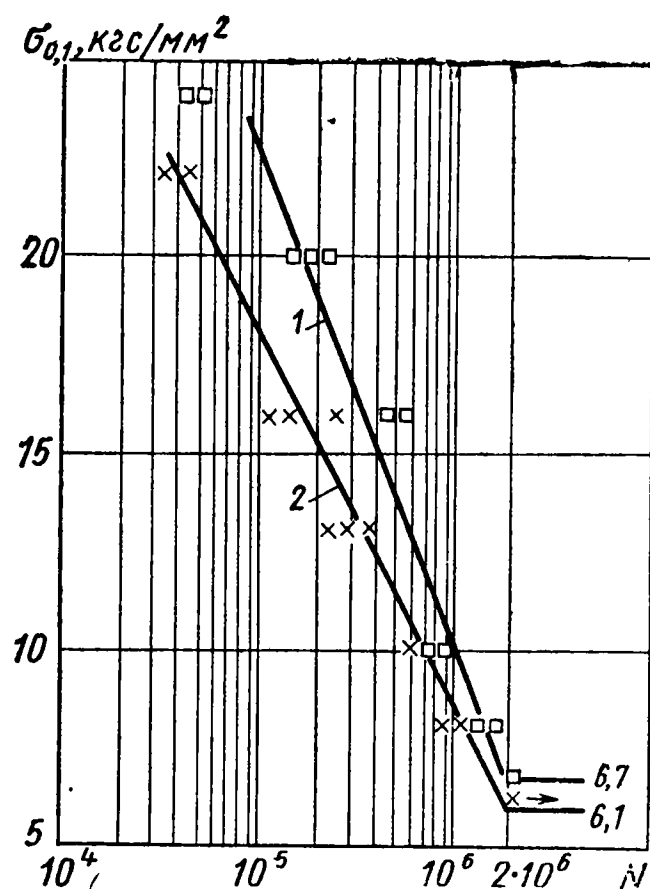


Рис. 35. Выносливость паяных соединений внахлестку:
кривая 1 — $l_n = 3\delta$; кривая 2 — $l_n = 2\delta$ ($\delta = 5$ мм)

нахлестки 2δ $\sigma_{0,1} = 6,1$ кгс/мм² (кривая 2), при длине 3δ $\sigma_{0,1} = 6,7$ кгс/мм² (кривая 1). Пайка образцов производилась медно-цинковым припоем Л62.

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Эксперименты по определению влияния внутренних непропаев на долговечность подтвердили, что непропаи меньше 40%, не выходящие на поверхность, заметно не снижают срок службы соединений в случаях, когда соединение спроектировано с учетом требований статической равнопрочности (рис. 36).

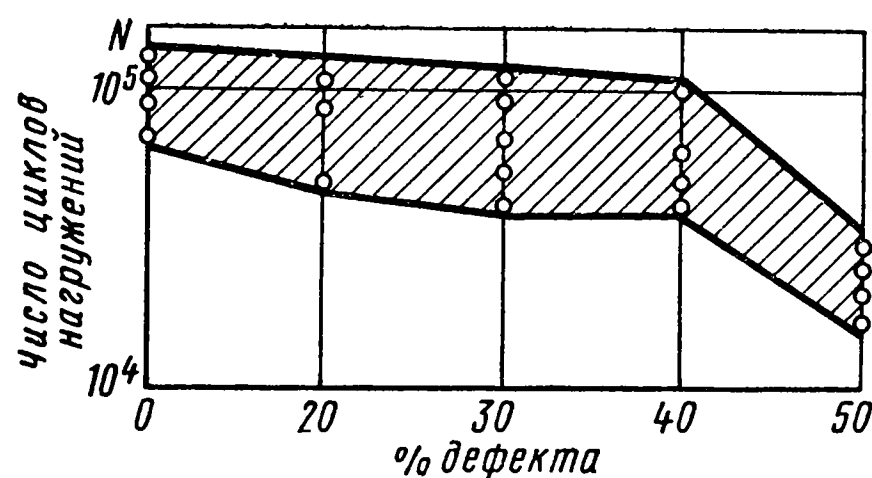


Рис. 36. Влияние внутренних непропаев на прочность паяных соединений при переменных нагрузках

По оси абсцисс отложен процент дефекта по отношению ко всей площади шва, по оси ординат — число циклов нагружений. Образцы были изготовлены из стали 10, припой — Л63, пайка производилась газовой горелкой, $\sigma = 1570$ кгс/см².

При этих условиях разрушения в бездефектных соединениях и в соединениях с небольшими непропаями происходили по основному металлу. Дефект соединения

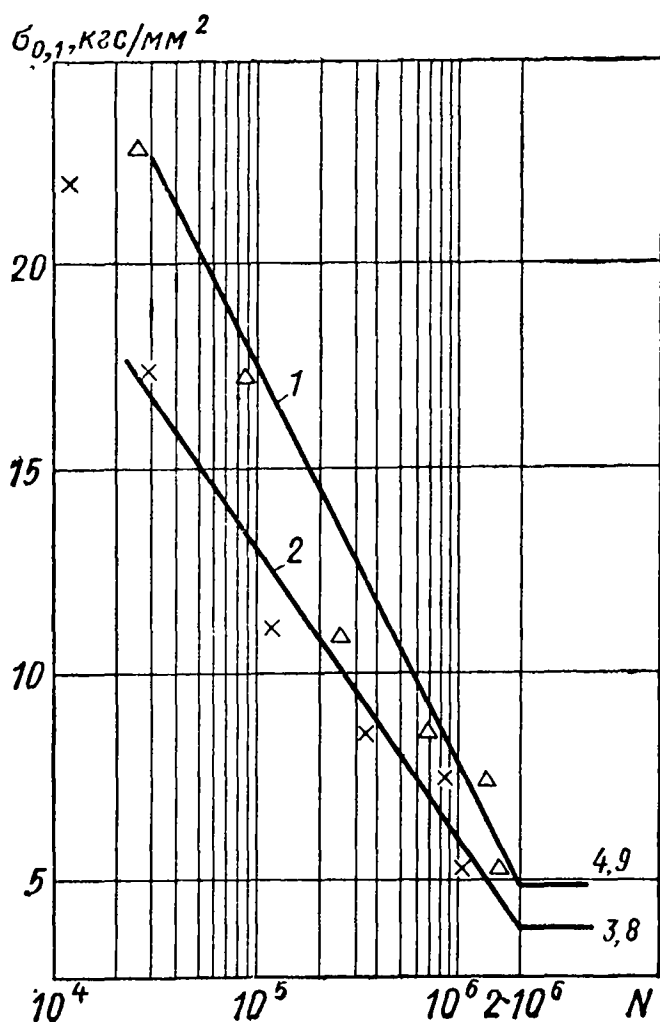


Рис. 37. Выносливость паяных соединений внахлестку:

кривая 1 — образцы с галтелью; кривая 2 — образцы без галтели

не вызывал достаточно сильной концентрации напряжений, которая бы переместила разрушение в зону шва. Лишь при непропае свыше 40% разрушения наступали по участку шва и срок службы резко падал с ростом дефекта.

Существенное влияние на выносливость паяных соединений внахлестку оказывают галтели.

Испытания показали, что отсутствие галтели повышает концентрацию напряжений и понижает предел выносливости (рис. 37). Для паяного соединения, выполненного с галтелью, предел выносливости $\sigma_{0,1} = 4,9$ кгс/мм² (кривая 1), для соединений без галтели $\sigma_{0,1} = 3,8$ кгс/мм². Пайка образцов производилась медно-цинковым припоем Л63, материал — сталь СтЗсп.

ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАЯНОГО ШВА

Изучение пластических свойств паяного шва производится по следующей методике. Образцы прямоугольного сечения высотой 20 мм и шириной 8 мм паяют один с другим по плоскости касаний. В этих зонах образцы обрабатывают по полукругу; при контактировании образцов оба полукруга, складываясь, образуют круг,

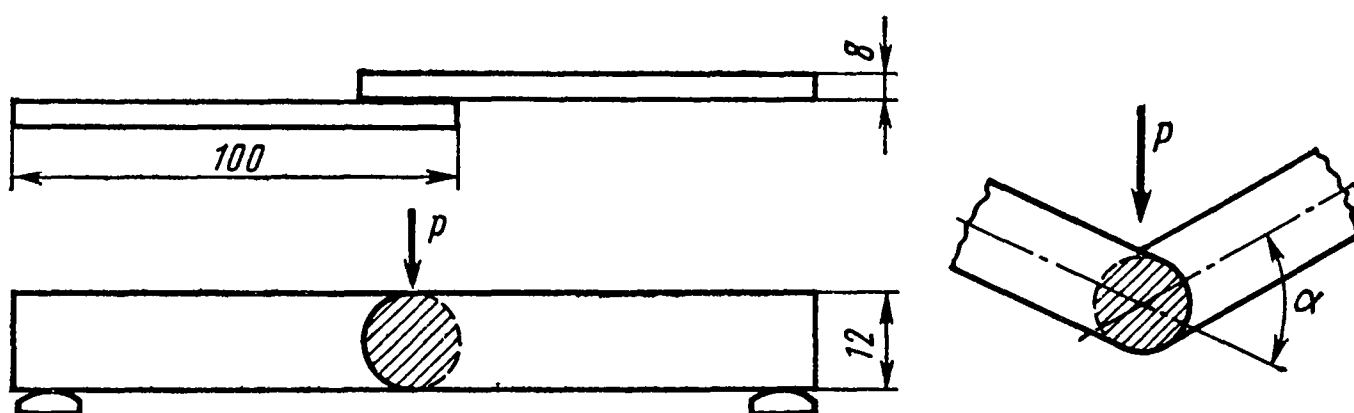


Рис. 38. Схема испытаний соединений для определения пластичности паяного шва

который и подвергается пайке. Образец после пайки укладывают на две опоры, а на участке паяного шва к нему прикладывают сосредоточенную силу P , которая вызывает изгиб конструкции в целом и скручивание участка шва. Это дает возможность определить пластические свойства паяного соединения, работающего под действием касательных напряжений. Деформация определяется углом α , образующимся между соединяемыми элементами при скручивании шва (рис. 38).

Испытуемые образцы были изготовлены из стали марки 10, пайка выполнена припоем Л62 газовой горелкой. При угле $\alpha \leq 4-5^\circ$ деформации в основном подчиняются закону упругости, при больших углах происходит пластическое деформиро-

вание. На рис. 39 показана зависимость угла загиба β , определяющего пластические свойства паяного соединения, от силы P . Наличие дефектов в шве ведет к образованию пластических деформаций при меньших нагрузениях, чем в хорошо пропаянных соединениях.

ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Допускаемые напряжения в паяных соединениях зависят от ряда факторов: от свойств основного материала, припоев и флюсов, от технологического процесса пайки, от толщины шва, вида соединения. Величины допускаемых напряжений зависят также от рода нагрузок — статических, переменных, от температуры эксплуатации, от среды, в которой работает конструкция.

Многие из указанных факторов, оказывающих непосредственное влияние на свойства паяных соединений, а следовательно, и на величины допускаемых напряжений, не дают возможности устанавливать числовые характеристики при помощи графиков или табличных данных. Единственно надежным и приемлемым методом установления допускаемых напряжений в паяных соединениях является испытание образцов при всех параметрах, близких к производственным.

Для паяных соединений встык рациональным является испытание до разрушения.

При этом разрушающее напряжение

$$\sigma_p = \frac{P}{F}, \quad (43)$$

где P — разрушающее усилие; F — площадь поперечного сечения испытуемого образца.

В качестве образца может быть принят образец, который обычно используют при оценке сварных стыковых соединений.

Допускаемое напряжение при пайке может быть установлено в зависимости от величины разрушающего напряжения и коэффициента запаса прочности K , который рекомендуется принимать равным 2,5—3,0 при статических нагрузениях.

При определении допускаемых напряжений в трубчатых телескопических паяных соединениях целесообразно проводить испытания аналогичных соединений.

Разрушающие напряжения в телескопическом паяном соединении

$$\tau = \frac{P}{F_{\text{ср}}}, \quad (44)$$

где $F_{\text{ср}}$ — площадь шва в телескопическом соединении.

Допускаемое напряжение может быть определено с учетом разрушающего напряжения при том же коэффициенте запаса, что и в паяных швах встык.

При определении допускаемых напряжений в паяных соединениях внахлестку испытания проводят над образцами, имеющими толщины, аналогичные применяемым в конструкциях при длине нахлестки 2,5 δ .

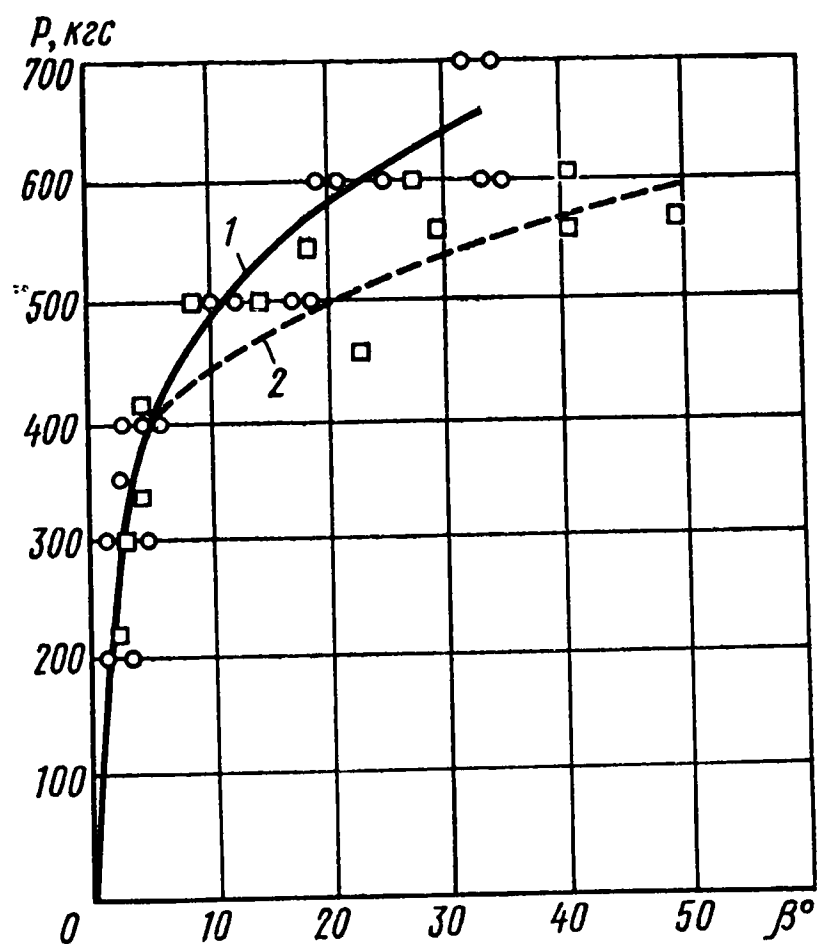


Рис. 39. Влияние непропаев на пластические свойства паяных соединений:

кривая 1 — образцы без дефектов и с дефектом 20%; кривая 2 — образцы с дефектом 40%

Разрушающие напряжения

$$\tau = \frac{P}{b \cdot 2,5\delta}, \quad (45)$$

где b — ширина образца; δ — толщина образца.

Коэффициент запаса прочности такой же, как при испытании соединений встык.

При установлении допускаемых напряжений в соединениях уголка с листом испытания должны быть проведены на образцах аналогичного типа при тех же технологических процессах, которые применяют при изготовлении изделия.

В случае назначения допускаемых напряжений в паяных швах других типов соединений (сотовых, тавровых и т. д.) необходимо проводить предварительные испытания под нагрузкой.

При работе паяных соединений в условиях агрессивных сред или высоких температур испытания соединений для определения допускаемых напряжений должны проводиться в условиях соответствующих эксплуатационным.

При работе паяных соединений при переменных нагрузках допускаемые напряжения в них могут устанавливаться с учетом коэффициента γ , определяемого выражением

$$\gamma = \frac{1}{0,6\beta \pm 0,2 - (0,6\beta \mp 0,2)r}, \quad (46)$$

где β — эффективный коэффициент концентрации напряжений при пайке соединений из малоуглеродистой стали. В соединениях встык $\beta = 1,2$, внахлестку $\beta = 3,0$, в телескопических соединениях $\beta = 2,0$. При пайке низколегированных сталей, а также цветных сплавов указанные коэффициенты β следует увеличить в среднем на 20—30%; $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, здесь $\sigma_{\min}$ и $\sigma_{\max}$ — наибольшее и наименьшее напряжения по абсолютной величине, взятые со своими знаками; верхние знаки в формуле (46) принимаются при преобладающем растяжении соединения, нижние знаки — при сжатии.

Пример 1. Паяная тавровая балка работает под действием изгибающего момента, создаваемого силой $Q = 20$ тс (рис. 40, а). Требуется определить величину касательных напряжений, возникающих в паяном шве. Материал балки — сталь Ст3. Пайка шва выполнена припоем на железной основе, допускаемое напряжение на срез для паяного шва принимаем $[\tau] = 1100$ кгс/см².

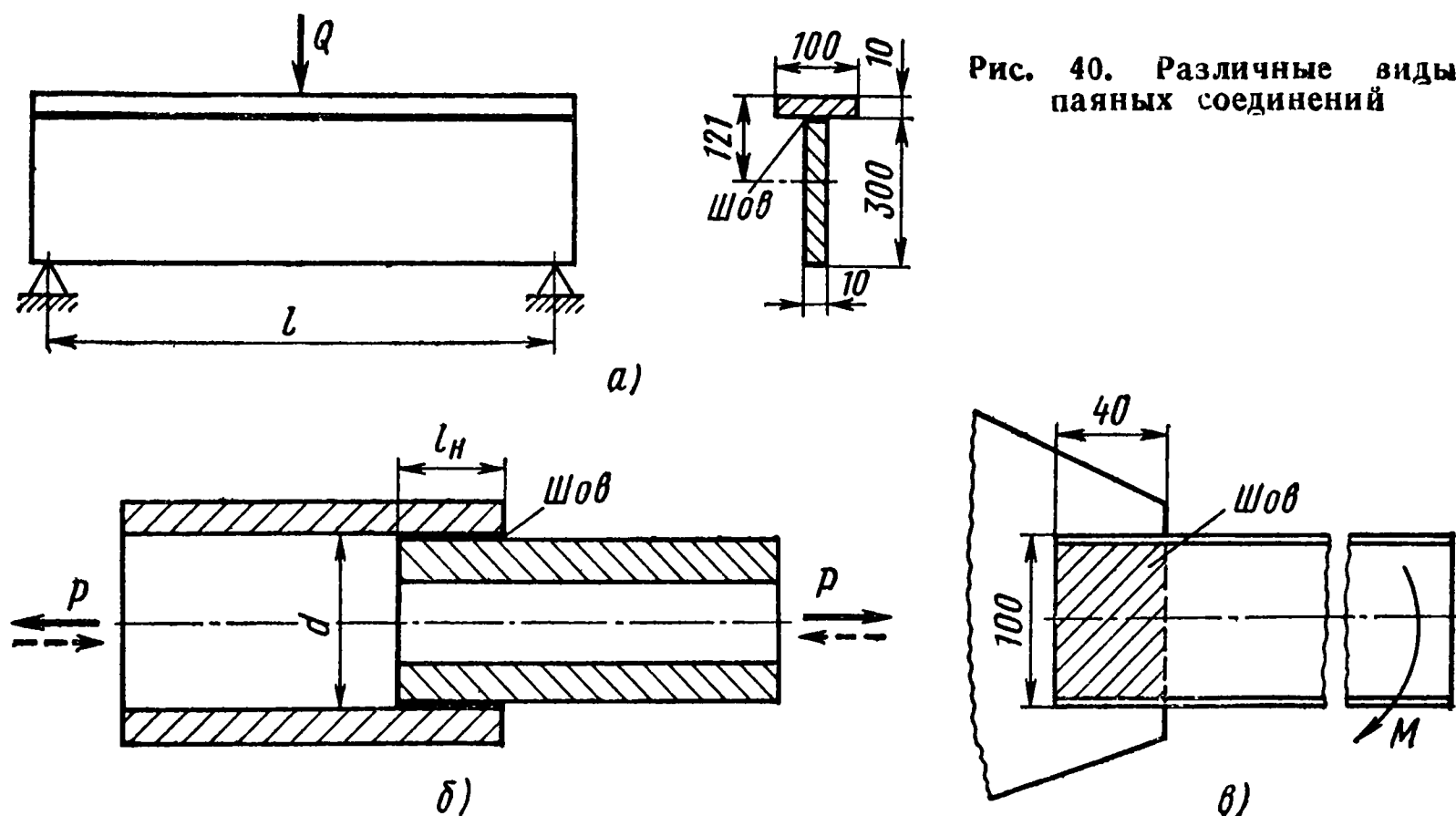


Рис. 40. Различные виды паяных соединений

Касательные напряжения в шве от поперечной силы

$$\tau = \frac{QS}{J\delta} \leq [\tau].$$

Статический момент площади пояса относительно центра тяжести

$$S = 1 \cdot 10 \cdot 11,6 = 116 \text{ см}^3.$$

Момент инерции сечения

$$J_x = \frac{10 \cdot 1^3}{12} + 1 \cdot 10 \cdot 11,6^2 + \frac{1 \cdot 30^3}{12} + 1 \cdot 30 \cdot 3,9^2 = 4047 \text{ см}^4.$$

Толщина пояса $\delta = 10$ мм, тогда

$$\tau = \frac{20\,000 \cdot 116}{1 \cdot 4047} = 575 \text{ кгс/см}^2.$$

Пример 2. Телескопическое паяное соединение двух труб работает под знакопеременной нагрузкой $P = 15$ тс (рис. 40, б). Коэффициент $r = -1$. Соединение выполнено медноцинковым припоем Л62. Материал труб — сталь 10. Диаметр меньшей трубы $d = 40$ мм. По опытным данным, минимальное разрушающее напряжение на срез для этого соединения $\tau_p = 2700$ кгс/см² [6]. Принимаем коэффициент запаса прочности $K = 2,5$. Определим необходимую длину нахлестки

Допускаемое напряжение на срез при статическом нагружении

$$[\tau] = \frac{\tau_p}{K} = \frac{2700}{2,5} = 1080 \text{ кгс/см}^2.$$

Коэффициент запаса с учетом переменного характера нагружения

$$\gamma = \frac{1}{0,6\beta + 0,2 - (0,6 - 0,2)r} = \frac{1}{0,6 \cdot 2 + 0,2 - (0,6 \cdot 2 - 0,2)(-1)} = \frac{1}{2,4},$$

так как $\beta = 2$ для телескопического соединения.

Отсюда допускаемое напряжение

$$[\tau]_{-1} = \frac{[\tau]}{\gamma} = \frac{1080}{2,4} = 450 \text{ кгс/см}^2.$$

Требуемая площадь нахлестки

$$F_n = \frac{P}{[\tau]_{-1}} = \frac{1500}{450} = 33,4 \text{ см}^2;$$

отсюда длина нахлестки

$$l_n = \frac{F_n}{\pi d} = \frac{33,4}{3,14 \cdot 4} = 2,66 \text{ см};$$

$$l_n = 2,7 \text{ см}.$$

Пример 3. Консольная балка — швеллер № 10 — прикреплена пайкой (рис. 40, в). Требуется определить допустимую величину момента. Материал балки — сталь Ст3. Пайка выполнена припоем на железной основе. Допустимое напряжение на срез $[\tau] = 1100$ кгс/см².

Момент сопротивления при кручении

$$W_k = 0,258 \cdot 10 \cdot 4^2 = 41,25 \text{ см}^3.$$

Для соотношения сторон $\frac{h}{b} = 2,5$ коэффициент $\alpha = 0,258$.

Отсюда допустимый момент

$$M = [\tau] W_k = 1100 \cdot 41,25 = 45\,400 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ёсида Е. Прочность соединений, паяных твердым припоем. — «Есену Гоккайси», 1957, т. 26, № 11, с. 714—718.

2. Лашко Н. Ф., Лашко С. В., Гришин В. Л. О некоторых вопросах взаимодействия титана с припоями при диффузионной пайке — «Сварочное производство», 1968, № 3, с. 3—5.

3. Лоцманов С. Н., Петрунин И. Е. Пайка металлов. М., «Машиностроение», 1966, с. 130—138.

4. Николаев Г. А. Сварные конструкции М., Машгиз, 1962, 550 с

5. Николаев Г. А., Ольшанский Н. А. Новые методы сварки металлов и пластмасс. М., «Машиностроение», 1966, 231 с.

6. Николаев Г. А., Киселев А. И. Работа мягкой прослойки паяных соединений — «Сварочное производство», 1969, № 12, с. 3—4.

7. Рыльников В. С., Губин А. И. Пайка титана серебряными припоями. — «Сварочное производство», 1970, № 1, с. 32—34.

8. Шиняев А. Я., Бондарев В. В. Диффузионная пайка титана с применением промежуточных гальванопокрытий. — «Сварочное производство», 1966, № 7, с. 14—16.

9. Яновский И. И., Тененбаум М. М., Романенко Н. Н. О снижении внутренних напряжений при пайке пластинок твердого сплава. — «Вестник машиностроения», 1960, № 5, с. 52—57.

10. Bredss N. Investigation of factors determining the tensile strength of brasing joints. — «Welding Journal», 1954, N 11, 545 p.

11. Brooker H. K., Beatson E. V. Industrial Brasing London, 1954, 583 p.

12. Leach R. H. Journ. Soc. Naval Inqrs. S. 1, 1939, 511 p.

13. Rudinger K. und Ismar A. Löten von Titan und Titanlegierungen — «Schweißen und Schneideu», 1967, N 2, s. 50—53.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПАЙКИ

ЗАДАЧИ И ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Основными задачами при проектировании технологического процесса (ПТП) являются:

- разработка принципиальной схемы технологического процесса, т. е. установление определенной последовательности операций по получению заготовок и преобразованию их в законченное изделие, которое соответствовало бы заданным технико-экономическим требованиям (ТЭТ);

- составление технических условий (ТУ) на заготовки и приемку изделия, включая операции обработки деталей, сборки их и контроля;

- расчеты или выбор режимов подготовительно-заключительных и основных операций технологического процесса;

- выбор типажа оборудования, проектирование технологической оснастки и составление технической документации;

- расчет технических норм времени, загрузки оборудования, рабочих мест и уровня механизации;

- организация рабочих мест.

Задачи ПТП решаются на базе определенных принципов, выработанных теорией и практикой общественного производства. Главный из них — принцип использования новейших достижений отечественной и зарубежной науки и техники. В условиях современной научно-технической революции этот принцип становится основополагающим.

Другим, не менее важным принципом, является принцип обеспечения минимальных сроков ПТП, как выражение объективных требований одного из экономических законов — закона экономии времени, который назван К. Марксом первым экономическим законом на основе коллективного производства [5].

Следующий принцип состоит в том, что при технологическом проектировании выбирают наиболее экономичные методы изготовления для обеспечения должной работоспособности, долговечности и надежности изделия. Наряду с этим должен соблюдаться принцип учета производственных возможностей на серийных заводах, осваивающих новое изделие, при одновременной ориентации на передовые формы организации и технологии производства, на наиболее эффективные методы управления трудовыми процессами, на творческую инициативу изобретателей и рационализаторов.

Наконец, должен соблюдаться принцип обеспечения строгой технологической дисциплины во всех звеньях производственного процесса и высокого качества изделий.

Весь комплекс вопросов, решаемых в ходе ПТП и конструирования изделия (КИ), а также устанавливающиеся при этом прямые и обратные связи можно изобразить в виде логической блок-схемы (рис. 1).

В этой схеме исходным задающим блоком является техническое задание (ТЗ), содержащее технико-экономические требования, а также условия транспортировки, хранения и эксплуатации (УТХЭ) изделия.

В распоряжении конструкторской (КС) и технологической служб (ТС) находится блок технической и экономической информации (ТЭИ) в виде аннотаций, рефератов, руководящих материалов, справочников, стандартов, нормалей, описаний изобретений и патентов, результатов научно-исследовательских работ и других данных, имеющих к началу поступления ТЗ.

В результате конструирования изделия (КИ) и ПТП составляется технико-экономическое обоснование проекта (ТЭОП) изделия, позволяющее начать экспериментальные исследования (ЭИ): опытно-конструкторские работы (ОКР) и опытно-технологические работы (ОТР). Получаемая при этом информация по каналам обратной связи направляется в блок ТЭИ и через него в блоки КИ и ПТП. Преобразуясь в этих блоках в результате корректировки проекта изделия и технологического процесса его изготовления, информация вновь поступает в блок ЭИ.

На определенном этапе этот кругооборот позволяет реализовать выходные данные в опытном образце изделия (ООИ), который затем сдается в серийное производство.

Длительность воплощения ТЗ в ООИ составляет от одного до трех — пяти лет и зависит как от характера объекта изготовления, так и от технологического совершенства производства в данной отрасли.

Этот процесс был бы значительно более кратковременным, если бы в общей взаимосвязи рассмотренных элементов действовал блок математической модели технологического процесса (см. рис. 1). Таким образом, математическое моделирование технологических процессов (ММТП) стало объективно необходимым. Оно должно рассматриваться как одно из эффективных направлений в обеспечении технологического превосходства и, следовательно, в укреплении экономического потенциала страны.

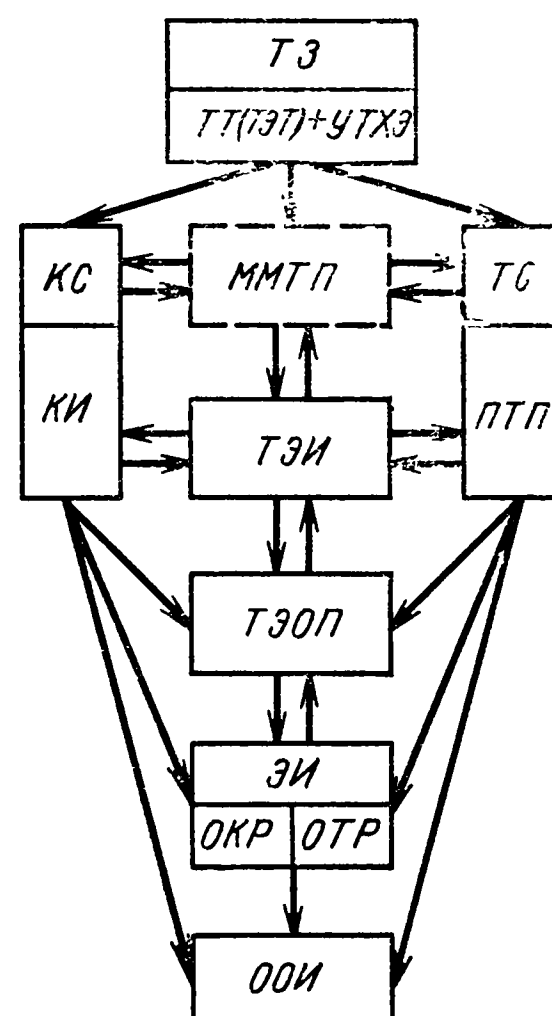


Рис. 1. Логическая блок-схема разработки нового изделия (агрегата, узла)

ПОНЯТИЕ О МОДЕЛИРОВАНИИ И ОБЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Изделия с гарантированной долговечностью и надежностью можно изготавливать тогда, когда технологический процесс исследован во всех его многочисленных внутренних связях. Экспериментальные методы исследования результативны, но трудоемки, сложны и связаны с большими затратами средств и времени. Аналитические методы отличаются экономичностью и быстродействием, поскольку основаны на использовании вычислительной техники, но для их реализации требуется математическое моделирование реальных процессов, в том числе и процесса изготовления паяных изделий [44].

Процессы пайки в совокупности можно представить как целостную систему. Существенными ее характеристиками являются системные качества, состав, динамическая структура и характер взаимодействия с внешними условиями.

Целостная система играет ведущую роль по отношению к своим частям, которые в то же время обладают относительной самостоятельностью. Упорядочение системы есть не что иное, как процесс управления системой. Конечная цель управления — обеспечение оптимального процесса производства, например, паяных изделий.

Одним из наиболее эффективных средств познания системы и управления ею является моделирование, т. е. воспроизведение той или иной сложной системы посредством более простой системы — модели. Моделирование основано на изоморфизме (структурном или функциональном сходстве) различных систем. Оно позволяет воспроизводить и изучать сложные системы в математических или физических моделях.

Модель должна иметь определенное сходство (аналогию) с оригиналом, но это сходство не должно быть полным, поскольку в этом случае теряется специфика модели, ее назначение. При этом можно говорить о моделях 1, 2 или n -го приближения к оригиналу. Вместе с тем модель не должна быть произвольной, не соответствующей оригиналу. В этом случае она не дает представления об оригинале и не может выполнять функцию модели.

Меняя параметры модели, исследователь получает данные, аналогичные тем, которые имели бы место в действительности при изменении реальных условий. Таким образом, испытывается множество вариантов модели, каждый из которых представляет собой определенное сочетание факторов, и из этого множества выбирается вариант, оптимальный или близкий к оптимальному при заданных реальных условиях.

Характерная особенность математического моделирования состоит в том, что при изучении любого процесса таким методом необходимо в первую очередь построить

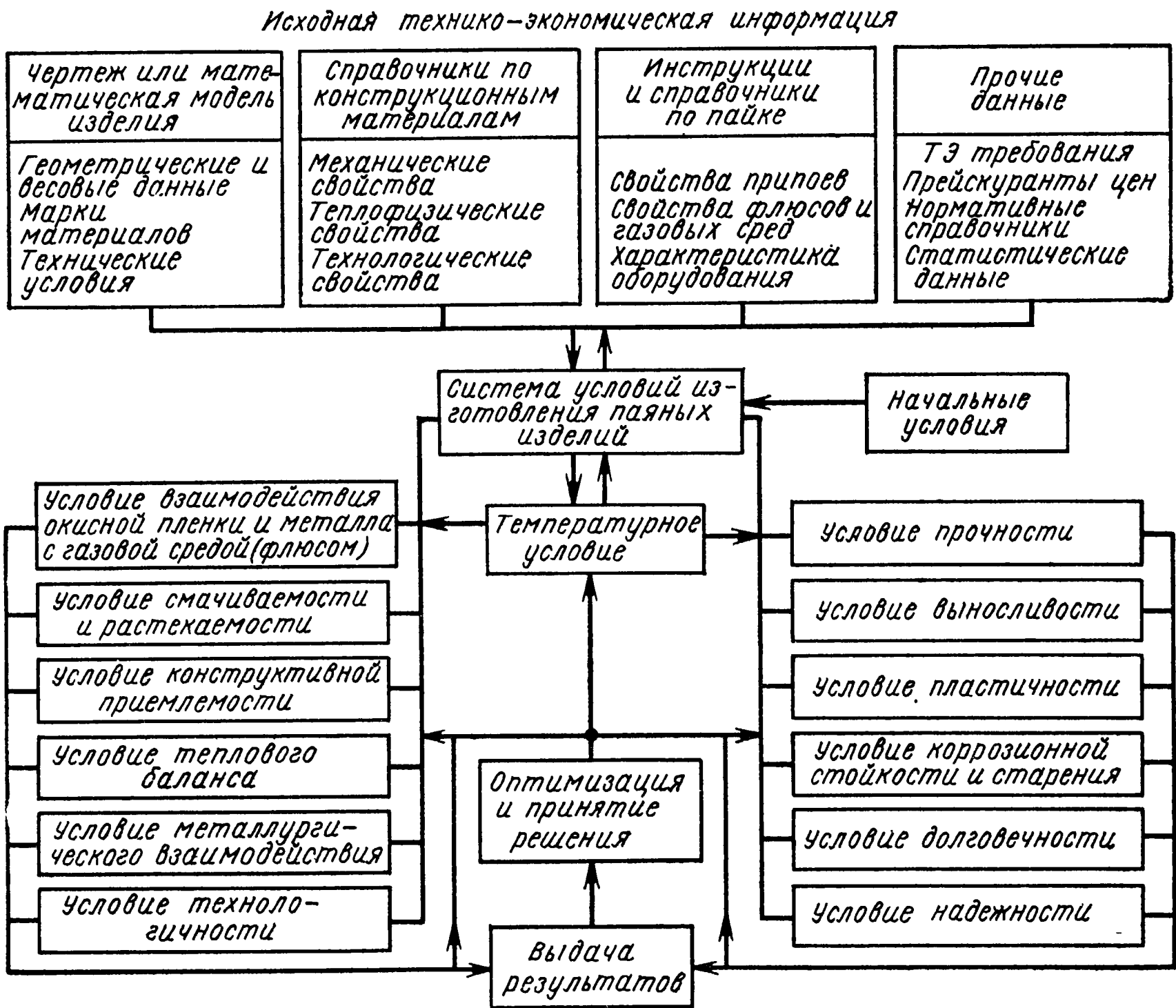


Рис. 2. Схема общей математической модели процессов пайки

математическое описание или математическую модель изучаемого процесса. Наличие математического описания процесса — оригинала позволяет обоснованно выбрать соответствующий процесс — модель, пользуясь известными аналогиями и опытом моделирования других процессов.

Математическая модель реального процесса есть некоторый математический объект, соответствующий данному физическому процессу. Всегда существуют соотношения, которые в виде математических зависимостей выражают реальные физические связи. Для реализации их на вычислительных машинах нужны именно эти соотношения.

Поэтому под математической моделью реального процесса следует понимать совокупность соотношений (например, формул, уравнений, неравенств, логических условий, операторов и т. д.), которые связывают характеристики процесса с параметрами соответствующей системы, исходной информацией и начальными условиями.

В данном определении вовсе не предполагается, что математическая модель состоит только из соотношений, выражающих характеристики процесса в виде

явных функций от параметров системы, времени, исходной информации и начальных условий. В общем случае этого может и не быть. Однако существенным свойством математической модели является то обстоятельство, что при совместном рассмотрении составляющих ее соотношений характеристики процесса однозначно (для детерминированных моделей) определяются через параметры системы, исходную информацию и соответствующие начальные условия. Построение модели целостной системы, выбор характеристик ее состояний и параметров, описывающих процесс функционирования системы, является своеобразной и сложной задачей. Указать какие-либо правила для выбора характеристик состояний и параметров исследуемых реальных систем пока не представляется возможным. Исследователь в этом отношении может руководствоваться лишь собственной интуицией, опирающейся на постановку прикладной задачи и понимание природы процесса функционирования системы [3].

Общая математическая модель процесса изготовления паяных изделий — это система условий в виде уравнений, неравенств, формул и количественных критериев, описывающих наиболее важные и характерные черты данного процесса. Блок-схема этой модели приведена на рис. 2.

Общая математическая модель позволяет:

сформулировать условия, при которых пайка обеспечивает получение долговечных и надежных изделий или узлов;

определить границы эффективного применения пайки;

составить моделирующие алгоритмы для воспроизведения модели на клавишных или электронных вычислительных машинах при решении различных задач в зависимости от характера вводимых (заданных) величин;

наметить теоретические основы технологического проектирования процесса изготовления паяных изделий с широкими возможностями прогнозирования оптимальности различных операций и режимов пайки.

ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПАЙКИ

В математически записанных условиях должно быть дано в виде совокупности взаимосвязанных и взаимообусловленных факторов краткое и достаточно точное выражение существа производства паяных изделий. Рассмотрим эти условия.

Температурное условие. Процесс пайки происходит без оплавления материала детали: плавится лишь припой, а основной металл подогревается до температуры пайки, которая несколько выше температуры плавления припоя, но всегда ниже температуры плавления материала детали. При этом температура начала плавления припоя должна быть выше рабочей температуры детали в эксплуатации. В противном случае при достаточно высокой рабочей температуре паяная деталь окажется неработоспособной.

Таким образом, это условие можно записать в следующем виде:

$$t_1 > t_2 > t_3 > t_4, \quad (1)$$

где t_1 — температура начала плавления (точка солидуса) материала детали, °C; t_2 — температура нагрева детали при пайке, или температура пайки, °C; t_3 — температура начала плавления (точка солидуса), припоя, °C; t_4 — рабочая температура паяного соединения при эксплуатации, °C.

Величины, входящие в выражение (1), могут быть найдены по формулам

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= t_2 + \Delta t_1; \\ t_2 &= t_3 + \Delta t_2 + \Delta t_3; \\ t_3 &= t_4 + \Delta t_4, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где Δt_1 — превышение температуры начала плавления материала над температурой пайки, необходимое из условия сохранения формы детали при нагреве в процессе пайки, °C; Δt_2 — технологический фактор, учитывающий необходимость перегрева расплавленного припоя выше точки ликвидуса для лучшего смачивания конструкционного материала и затекания в зазоры между соединяемыми деталями, °C;

Δt_3 — интервал кристаллизации припоя, т. е. разность между температурами конца t'_3 и начала t_3 плавления припоя или между температурами ликвидуса и солидуса припоя, °С; Δt_4 — минимальный температурный запас работоспособности припоя, °С.

Решая совместно выражения (1) и (2) относительно t_3 и учитывая необходимость исключения погрешностей измерения температур, получаем

$$t_1 - \Delta t_1 - \Delta t_2 - \Delta t_3 \geq t_3 \geq t_4 + \Delta t_4. \quad (3)$$

Чтобы исключить величины, не поддающиеся строгому учету, введем коэффициенты

$$K_1 = t_2/t_1 \quad \text{и} \quad K_2 = \frac{T_4}{T_3}, \quad (4)$$

где T_4 и T_3 — абсолютные температуры, К. Отношение температур, выражаемое коэффициентом K_2 , называют гомологической (сходственной) температурой сплава

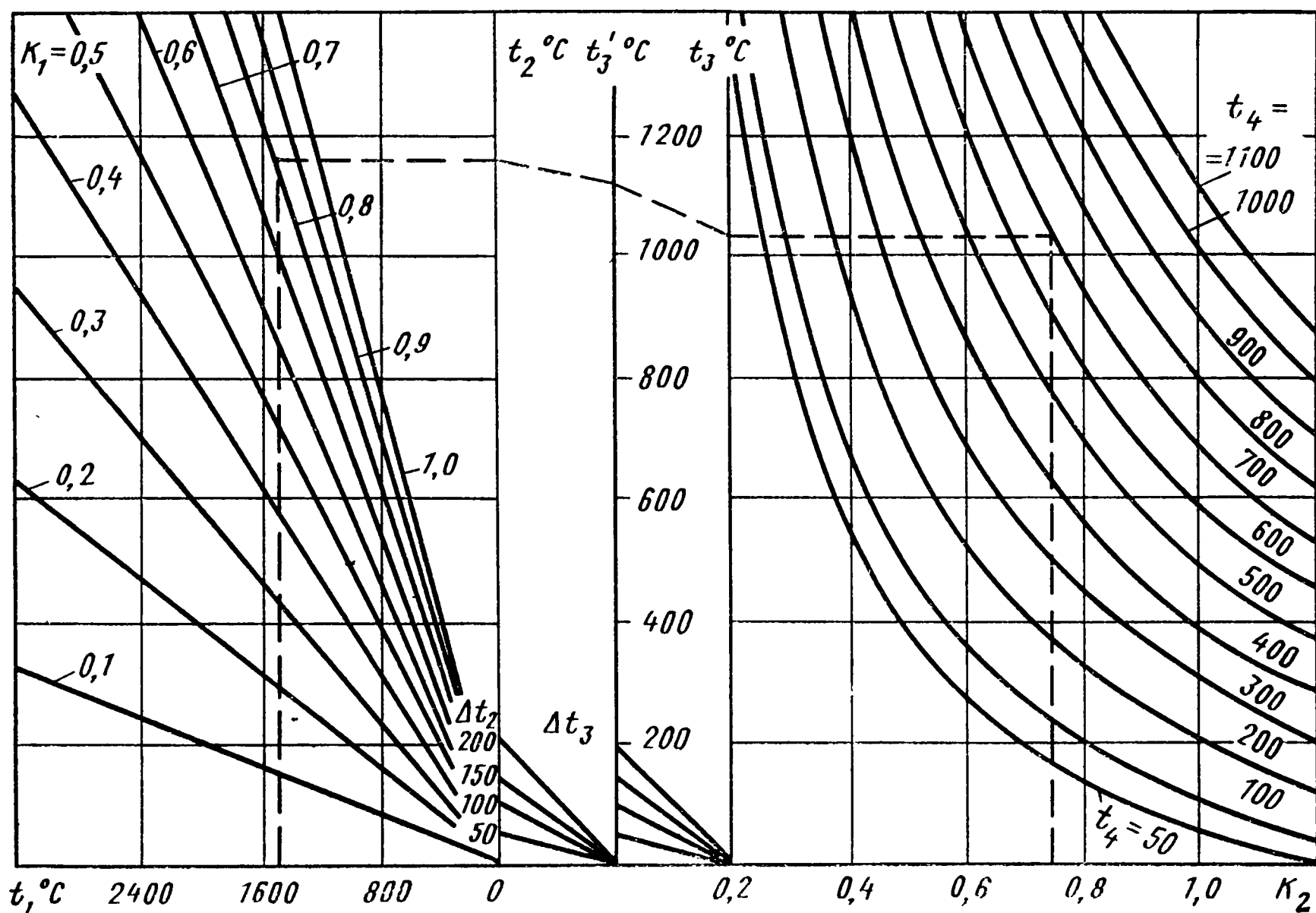


Рис. 3. Номограмма для расчета температурного условия пайки

(в данном случае припоя) и нередко используют для расчета прочности и упругости сплавов.

После подстановки (4) в (3) и некоторых преобразований имеем

$$K_1 t_1 - \Delta t_2 - \Delta t_3 \geq t_3 \geq t_4 + \frac{1 - K_2}{K_2} (t_4 + 273). \quad (5)$$

На рис. 3 это условие изображено в виде номограммы. При расчетах и при использовании номограммы рекомендуется выбирать возможно большее значение K_1 , но, как следует из статистических данных, не выше 0,85—0,95. Значение Δt_2 выбирают в пределах 15—75° С, а Δt_3 обычно указывается в инструкциях и справочниках по пайке, но для эвтектических припоев и чистых металлов $\Delta t_3 = 0$.

Как показывает опыт, значения K_2 следует выбирать в пределах 0,5—0,8, причем меньшие значения соответствуют большему запасу прочности.

Итак, зная марку конструкционного материала и, следовательно, температуру t_1 , а также t_4 , при выбранных коэффициентах K_1 и K_2 можно рассчитать или

определить по номограмме (рис. 3) пределы допустимых температур t_3 и t'_3 , по которым, пользуясь справочной литературой, нужно выбрать тот или иной припой.

По формуле (5) можно определить любую из входящих в нее величин, если известны остальные. В частности, если имеется в наличии определенный припой, то, зная температуру начала плавления t_3 и задавшись величиной K_2 , можно вычислить допустимую температуру t_4 по формуле

$$t_4 = K_2 t_3 - 273 (1 - K_2). \quad (6)$$

Расчет температуры пайки t_2 с учетом необходимости исключения погрешностей измерения температур, следует производить, пользуясь выражением

$$K_1 t_1 \geq t_2 \geq t_3 + \Delta t_2 + \Delta t_3. \quad (7)$$

На рис. 3 штриховой линией показан пример определения коэффициента K_2 по известным значениям $t_1 = 1485^\circ \text{C}$, $K_1 = 0,8$, $\Delta t_2 = 50^\circ \text{C}$, $\Delta t_3 = 100^\circ \text{C}$, $t_4 = 700^\circ \text{C}$ для припоя системы никель—хром—марганец—бор. При этом установлены не только величина $K_2 = 0,74$, но и ранее не известные для этого случая значения $t_2 = 1184^\circ \text{C}$ и $t_3 = 1034^\circ \text{C}$.

Поскольку температура пайки t_2 зависит от температуры начала рекристаллизации t_p паемого материала, то во избежание значительного изменения его структуры и снижения прочности необходимо конкретизировать условия выбора коэффициента K_1 . С этой целью введем понятие о коэффициенте α_p , характеризующем степень перегрева металла выше температуры t_p :

$$\alpha_p = \frac{t_2 - t_p}{t_1 - t_p}. \quad (8)$$

Если считать, что $t_2 \geq t_p$, то $0 \leq \alpha_p \leq 1$, поскольку при $t_2 = t_p$ $\alpha_p = 0$, а при $t_2 = t_1$ соответственно $\alpha_p = 1$. Однако возможны случаи, когда $t_2 < t_p$. Следовательно, здесь $\alpha_p < 0$.

Принимая соотношение

$$T_p = 0,4 T_{пл}, \quad (9)$$

получаем границу начала рекристаллизации технически чистых металлов.

Если величины, входящие в выражение (9), пересчитать в $^\circ\text{C}$, то при условии, что $T_{пл} = T_1$,

$$t_p = 0,4 t_1 - 164. \quad (10)$$

С учетом этого значения получаем

$$\alpha_p = \frac{t_2 - 0,4 t_1 + 164}{t_1 - 0,4 t_1 + 164}. \quad (11)$$

После подстановки $t_2 = K_1 t_1$, согласно формуле (4), и соответствующих преобразований имеем

$$K_1 = 0,4 + 0,6 \alpha_p - 164 \frac{1 - \alpha_p}{t_1}. \quad (12)$$

Эта зависимость представлена на рис. 4, а, на котором отмечена граница начала рекристаллизации. Итак, задаваясь различными значениями α_p , в том числе и $\alpha_p \leq 0$, можно обоснованно выбрать значение K_1 для расчетов по формуле (5) или номограмме (см. рис. 3).

Для большинства промышленных сплавов выражение (9) не справедливо, поэтому рассмотрим случай, когда

$$T_p = 0,8 T_{пл}. \quad (13)$$

Выразив величины в $^\circ\text{C}$, получим

$$t_p = 0,8 t_1 - 55. \quad (14)$$

После подстановки этого значения в формулу (8) можно записать

$$\alpha_p = \frac{t_2 - 0,8 t_1 + 55}{t_1 - 0,8 t_1 + 55}. \quad (15)$$

Исключив t_2 , согласно выражению (4), и произведя некоторые преобразования, получим окончательно

$$K_1 = 0,8 + 0,2\alpha_p - 55 \frac{1 - \alpha_p}{t_1}. \quad (16)$$

График этой зависимости показан на рис. 4, б. В отличие от чистых металлов для промышленных сплавов имеется возможность выбирать существенно бóльшие значения K_1 при сопоставимых значениях α_p .

Как отмечалось, следует выбирать $0 \leq K_2 \leq 1$. Однако на практике имеют место случаи, когда $K_2 > 1$ (см. рис. 3). Объясняется это возможностью повышения (за счет диффузии в паяном шве) температуры вторичного расплавления припоя, или, точнее, зоны сплавления на некоторую величину:

$$\Delta t_{pc} = t_{3pc} - t_3, \quad (17)$$

где Δt_{pc} — превышение температуры начала распаивания паяной конструкции t_{3pc} над температурой t_3 припоя в исходном состоянии. При этом может оказаться, что $t'_3 \geq t'_{3pc}$.

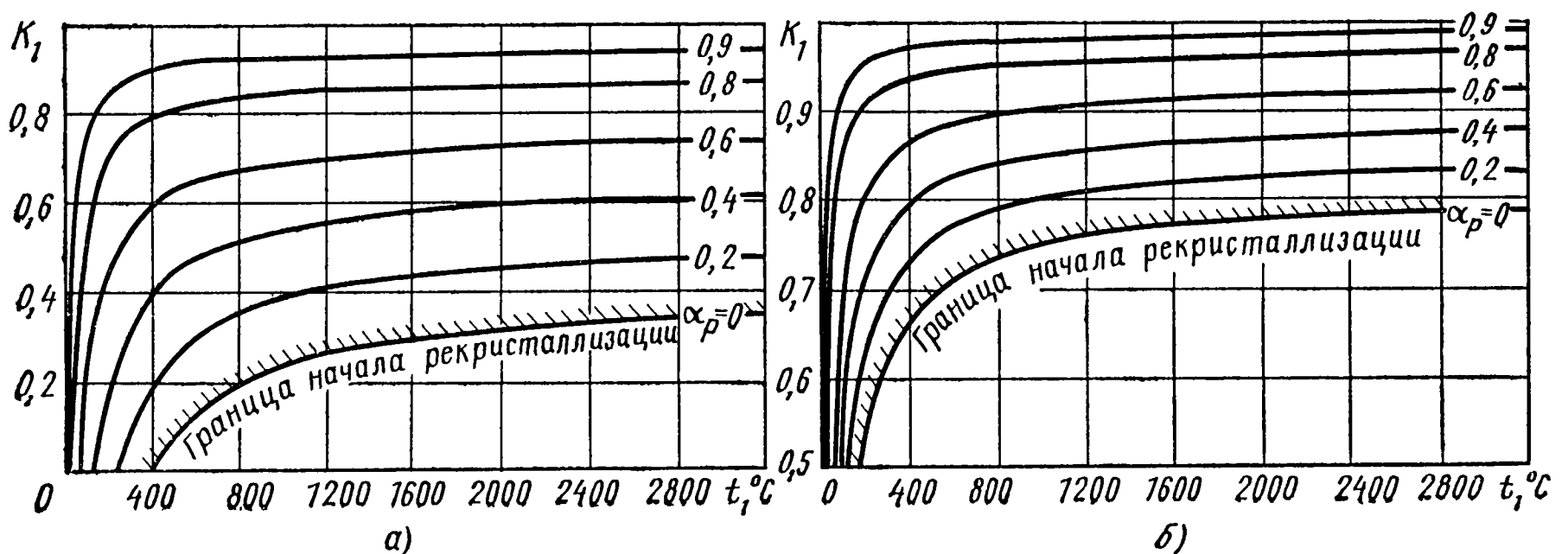


Рис. 4. Зависимость коэффициента K_1 от температуры начала плавления t_1 паяемых технически чистых металлов (а) или промышленных сплавов (б) и величины α_p

В этих случаях необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$K_{2pc} = \frac{t_4 + 273}{t_{3pc} + 273} \leq 1, \quad (18)$$

но при $t_4 \leq t_{3pc}$ можно допустить $t_3 < t_4$, потому что когда $0 < t_4 - t_3 \leq \Delta t_{pc}$, коэффициент $K_2 > 1$. Это обстоятельство существенно расширяет возможности эксплуатации паяных изделий при высоких температурах.

Далее необходимо учесть максимальную t_5 и минимальную t_6 температуры действия флюса или газовой среды.

Очевидно, что

$$t_5 - t_6 = \Delta t_5, \quad (19)$$

где Δt_5 — температурный интервал действия флюса или газовой среды [4, 12].

При этом необходимо обеспечить условия

$$t_5 \geq t_2 \text{ и } t_6 \leq t_3. \quad (20)$$

После подстановки этих условий в формулу (19) и преобразований получим

$$\Delta t_5 \geq \Delta t_2 + \Delta t_3. \quad (21)$$

При пайке температура нагрева изделия связана со временем τ . Следовательно, t_2 , t_p , t_5 , t_6 и другие величины являются не только характеристиками факторов, составляющих процесс пайки, но некоторыми значениями функции $t^\circ \text{C} = f(\tau)$ или $T^\circ \text{K} = \varphi(\tau)$.

Дифференциальное уравнение, описывающее в общем случае изменение температуры T изделия с поверхностью F во времени τ , получим из закона сохранения энергии в виде [15]

$$C_{\text{и}} \frac{dT}{d\tau} = \int_{\dot{F}} [\alpha (T_c - T) + q_{\text{л}} - \varepsilon \sigma_0 T^4] dF. \quad (22)$$

В этом выражении $C_{\text{и}}$ — полная теплоемкость, под которой понимают количество тепла, поглощаемого изделием при нагревании его на 1°C . Если изделие однородно, то $C_{\text{и}} = c\rho V$, где c , ρ и V — удельная теплоемкость, плотность и объем изделия. Если же оно состоит из разнородных частей, то величина $C_{\text{и}}$ может быть определена как сумма полных теплоемкостей его отдельных частей.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$, температуру окружающей среды T_c , например в печи, поглощаемый изделием удельный лучистый тепловой поток $q_{\text{л}}$ и степень черноты поверхности паемого изделия ε принимаем постоянными во времени, но они могут изменяться по поверхности изделия. Величина $q_{\text{л}}$ считается положительной, если изделие поглощает тепловой поток. Коэффициент излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана-Больцмана) $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} (\text{Вт}/\text{м}^2 \times ^\circ\text{C}^4)$.

Уравнение (22) можно записать через средние значения параметров следующим образом:

$$\frac{C_{\text{и}}}{F} \cdot \frac{dT}{d\tau} = \alpha_{\text{ср}} (\tilde{T} - T) - \varepsilon_{\text{ср}} \sigma_0 T^4, \quad (23)$$

где

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{1}{F} \int_{\dot{F}} \alpha dF; \quad \tilde{T} = \frac{1}{\alpha_{\text{ср}} F} \int_{\dot{F}} (\alpha T_c + q_{\text{л}}) dF; \quad \varepsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{F} \int_{\dot{F}} \varepsilon dF.$$

Если поверхность изделия можно разбить на n конечных участков с площадью F_i , в пределах каждого из которых значения α_i , T_{ci} , $q_{\text{ли}}$ и ε_i постоянные, то интегралы в последних соотношениях заменяем конечными суммами

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \alpha_i F_i; \quad \tilde{T} = \frac{1}{\alpha_{\text{ср}} F} \sum_{i=1}^n (\alpha_i T_{ci} + q_{\text{ли}}) F_i; \quad \varepsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i F_i.$$

Связь между τ и T при нестационарном нагреве от начальной температуры $T_{\text{нач}}$ ($\tau = 0$) до температуры пайки T_2 можно получить путем решения уравнения (23):

$$\tau = \frac{C_{\text{и}}}{F} \int_{T_{\text{нач}}}^{T_2} \frac{dT}{\alpha (\tilde{T} - T) - \varepsilon \sigma_0 T^4}. \quad (24)$$

Это выражение может быть приведено к безразмерному виду

$$\tau^* = \int_{\vartheta_{\text{нач}}}^{\vartheta_2} \frac{d\vartheta}{1 - \vartheta - N\vartheta^4}, \quad (25)$$

где $\vartheta_{\text{нач}} = T_{\text{нач}}/\tilde{T}$ и $\vartheta = T/\tilde{T}$ — относительные начальная и текущая температуры, а $\vartheta_2 = T_2/\tilde{T}$ — относительная температура пайки; $\tau^* = \alpha \tau F / C_{\text{и}}$ — безразмерное время и фактор $N = \frac{\varepsilon \sigma_0}{\alpha} \tilde{T}^3$.

Интеграл вычисляем по правилам интегрирования рациональных функций. График получаемой при этой зависимости может быть использован на практике.

Из общего уравнения (22) можно получить ряд частных случаев, когда, например, отсутствует конвективный теплообмен ($\alpha = 0$), или можно пренебречь собст-

венным излучением изделия, или изделие лишь излучает тепло со своей поверхности, т. е. когда $\alpha = 0$ и $q_{\text{л}} = 0$. Уравнение (22) позволяет решать некоторые задачи по оптимизации нагрева паяемого изделия на основе методики, изложенной в работе [24].

Итак, выражения (4) — (8), (17) — (21) и (23) — (25), взятые в совокупности, и составляют температурное условие пайки.

Условие взаимодействия окисной пленки и металла с газовой средой (флюсом). Окисная пленка препятствует образованию металлической связи между расплавленным припоем и металлом и поэтому должна быть удалена. Наиболее эффективным средством удаления окисных пленок при пайке рельефных изделий оказались специальные газовые флюсы, которые активно взаимодействуют не только с окислами, но и с металлом.

При химической реакции изменяется термодинамический потенциал системы [4]:

$$Z_2 - Z_1 = \Delta Z_T, \quad (26)$$

где Z_1 и Z_2 — термодинамические потенциалы системы в состояниях I и II; ΔZ_T — изменение термодинамического потенциала системы или термодинамический потенциал реакции, ккал/моль.

Реакция протекает самопроизвольно только в том направлении, в котором термодинамический потенциал системы уменьшается, а энтропия увеличивается. Следовательно, в этом случае

$$Z_2 < Z_1 \quad \text{и} \quad \Delta Z_T < 0. \quad (27)$$

Поскольку пайка происходит обычно при постоянном давлении окружающей среды, то указанное изменение потенциала называют изобарным.

В общем случае изменение изобарного потенциала вещества при нагреве до температуры пайки T_2 определяется уравнением [12]

$$\begin{aligned} \Delta Z_T = \Delta H_{298} + \int_{298}^{T_1} \Delta C_{p1} dT + Q_1 + \dots + \int_{T_i}^{T_2} \Delta C_{pi} dT + Q_i - \\ - T \left(\Delta S_{298} + \int_{298}^{T_1} \frac{\Delta C_{p1}}{T} dT + \frac{Q_1}{T_1} + \dots + \int_{T_i}^{T_2} \frac{\Delta C_{pi}}{T} dT + \frac{Q_i}{T_i} \right), \end{aligned} \quad (28)$$

где ΔH_{298} — стандартная теплота образования (энтальпия) вещества; $T_1 \dots T_i$ — температуры фазовых превращений в интервале от 298°K до T_2 ; $\Delta C_{p1} \dots \Delta C_{pi}$ — изменение молярной теплоемкости при соответствующих интервалах температур; $Q_1 \dots Q_i$ — теплота фазовых превращений; ΔS_{298} — изменение стандартной энтропии.

Указанные термодинамические величины подсчитывают на основании известных положений физической химии.

Однако для расчета изменения изобарного потенциала до заданной температуры T_2 вместо уравнения (28) с достаточной степенью точности можно использовать более простую зависимость

$$\Delta Z_T = \Delta H_{298} + a_0 T_2 \lg T_2 + a_1 T_2^2 + a_2 T_2^{-1} + J_1 T_2 + J_2, \quad (29)$$

где a_0 , a_1 и a_2 — коэффициенты пропорциональности; J_1 , J_2 — константы.

Результаты вычислений ΔZ_T по формулам (28) и (29) приведены в справочных пособиях в виде таблиц и графиков для конкретных химических реакций. Они охватывают диапазон температур пайки T_2 от 200 до 2500°K и практически все встречающиеся случаи взаимодействия металлов и их окислов с галогидными газами (BF_3 , BCl_3 , BBr_3 , PCl_3), водородом, окисью и двуокисью углерода, метаном, хлором, фтором, бромом, углеродом, а также с HF , HCl и HBr .

Таким образом, при отсутствии справочных данных выражения (27), (28) или (27) и (29) могут быть использованы для совместного решения с уравнениями, неравенствами и другими элементами температурного условия.

Условие смачиваемости и растекаемости. Мерой смачиваемости конструкционного материала жидким припоем является косинус краевого угла θ :

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{23} - \sigma_{13}}{\sigma_{12}}, \quad (30)$$

где σ_{12} , σ_{13} и σ_{23} — поверхностное натяжение на границах соответствующих фаз (1 — жидкость; 2 — газовая среда, в частности, воздух; 3 — твердое тело). Если $\cos \theta = 1$, т. е. $\theta = 0$, то смачивание полное.

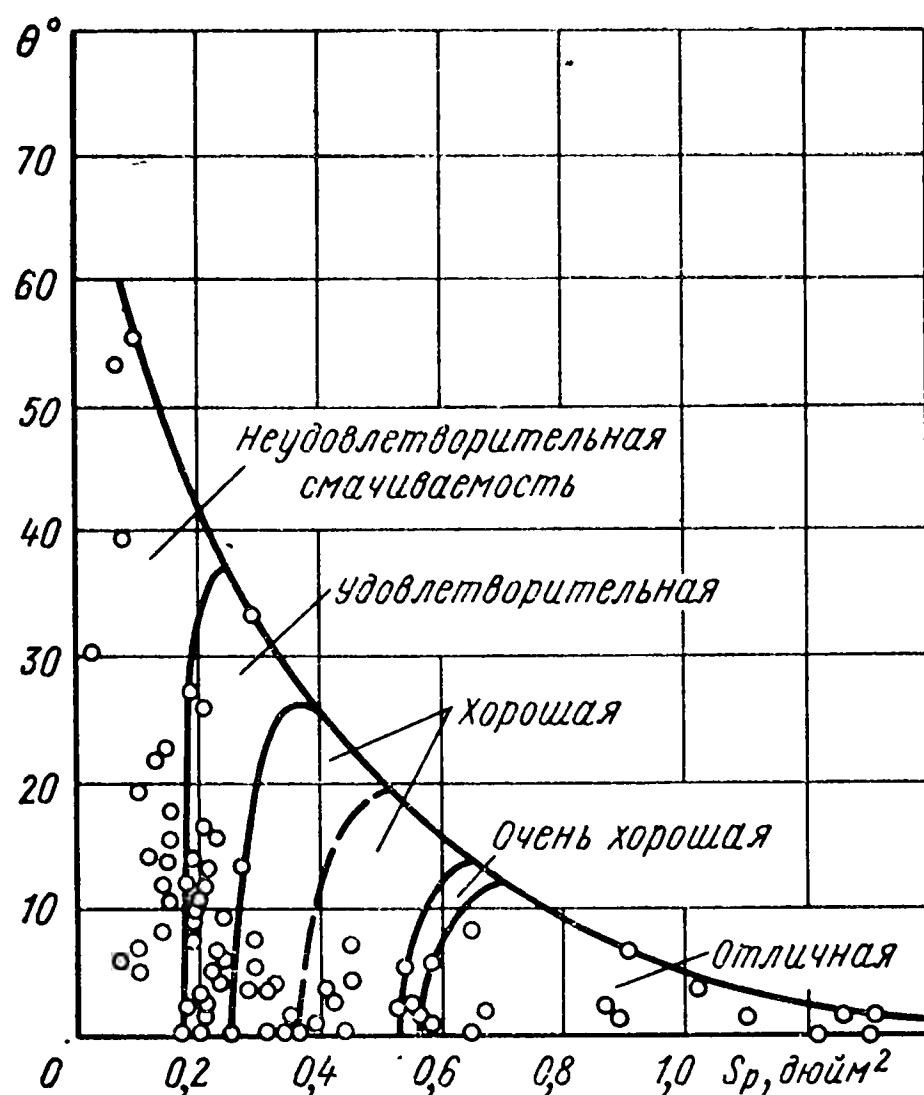


Рис. 5. Области допустимых и недопустимых значений θ° и S_p при пайке

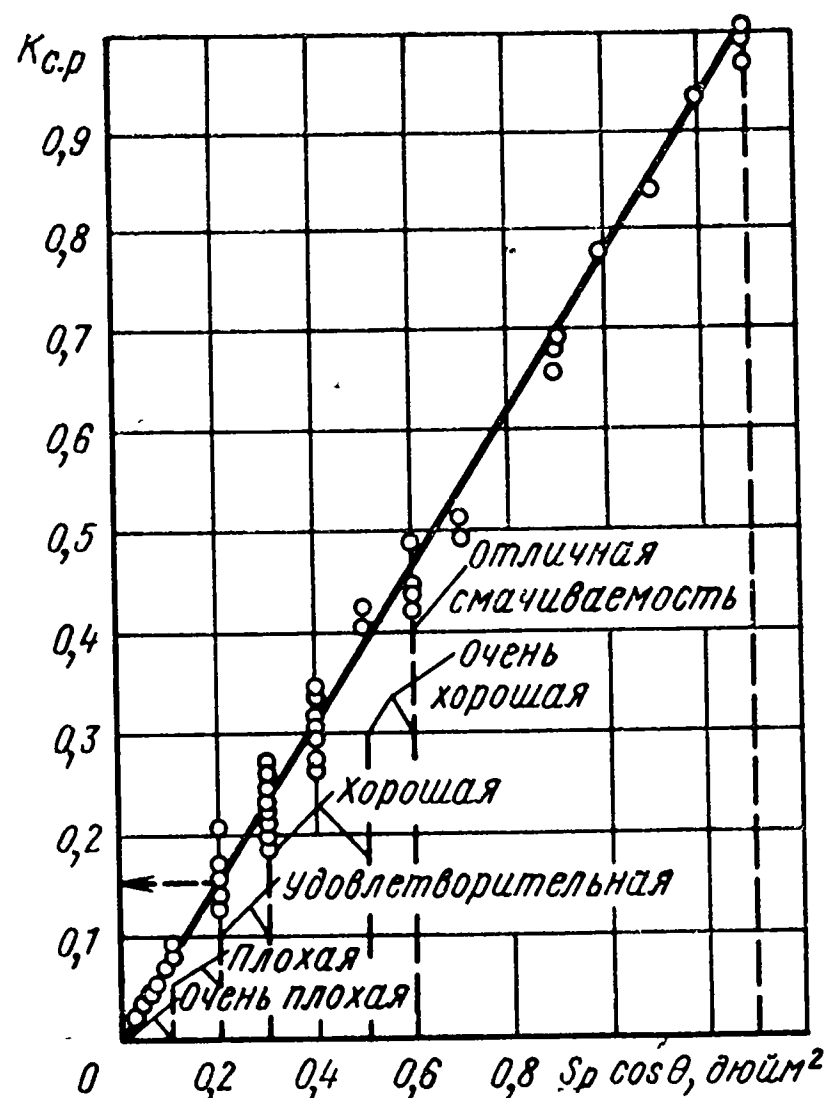


Рис. 6. График для определения минимально допустимых значений критерия смачиваемости и растекаемости $K_{c.p}$

Установлено, что при полном смачивании различные припои характеризуются разной площадью растекания S_p одинаковых по объему (в частности, $0,33 \text{ см}^3$) навесок припоя на одном и том же конструкционном материале при одинаковых условиях пайки. Однако нередко случаи получения больших значений S_p при неполном смачивании, что видно на графике (рис. 5), построенном на основе анализа и обработки экспериментальных данных, приведенных в работе [44]. В связи с этими положениями предложен комплексный критерий смачиваемости и растекаемости, представляющий собой произведение покрытой припоем площади (дюйм²) на косинус краевого угла.

Здесь этот фактор преобразован в безразмерный критерий:

$$K_{c.p} = \frac{S_p}{S_{\max}} \cos \theta, \quad (31)$$

где S_p и $S_{\max}$ — текущее и максимальные значения площади растекания навески припоя объемом $0,33 \text{ см}^3$ при выбранных условиях пайки.

Как видно на рис. 6, удовлетворительные значения фактора смачиваемости и растекаемости

$$0,155 \leq K_{c.p} \leq 1. \quad (32)$$

Зависимость на рис. 5 можно записать в виде полинома:

$$S_p = 1,3 - 0,0653\theta + 10^{-3} \cdot 1,438\theta^2 - 10^{-5} \cdot 1,172\theta^3, \quad (33)$$

где $\theta, \dots^\circ$, а S_p , дюйм².

Решая совместно выражения (33) и (31) и принимая $S_{\max} = 1,3$ дюйм², получаем расчетную формулу для безразмерного критерия

$$K_{c.p} = 0,769 \cdot \cos \theta (1,3 - 0,0653\theta + 10^{-3} \cdot 1,438\theta^2 - 10^{-5} \cdot 1,172\theta^3). \quad (34)$$

Как видно из этого выражения, при $\theta = 0$ $K_{c.p} = 1$, а при $\theta = 90^\circ$ $K_{c.p} = 0$. Графически эта зависимость представлена на рис. 7, где выявлен критический угол смачивания $\theta_{кр} = 37^\circ$, при котором допустимое значение $(K_{c.p})_{\min} = 0,155$. Это означает, что при $\theta > \theta_{кр}$ процесс пайки некачественный.

Таким образом, если из эксперимента выявлено хотя бы значение краевого угла θ° , то, согласно выражениям (32) и (34), можно судить об удовлетворении условия смачиваемости и растекаемости.

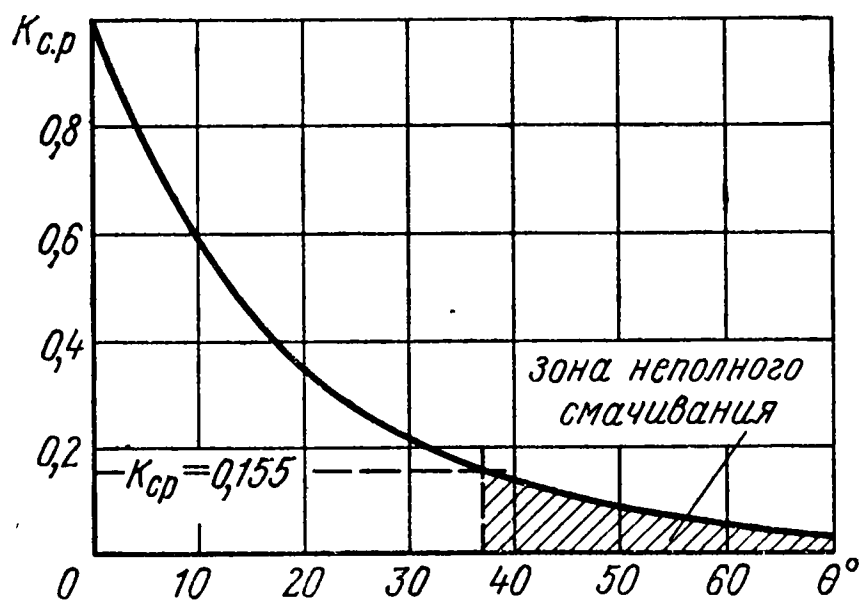


Рис. 7. К определению критического угла смачивания по формуле (34)

К числу критериев, характеризующих растекаемость, следует отнести также время и скорость заполнения жидким припоем капиллярных зазоров. Однако последние одновременно зависят и от геометрических параметров соединений: размеров зазоров, протяженности швов, высоты подъема припоя по капиллярам и т. п. С этой целью рассмотрим условие, отображающее особенности конструкции паяемого изделия.

Условие конструктивной приемлемости изделия. Это условие в виде системы количественных критериев

выражает степень соответствия процесса пайки тем особенностям конструкции, которые должны быть приняты во внимание при проектировании изделий под пайку.

Высота подъема h припоя в зазоре Δ может быть подсчитана по формуле

$$h = \frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{\gamma \Delta}, \quad (35)$$

где σ_{12} — поверхностное натяжение припоя в соответствующей газовой среде, кгс/см; γ — удельный вес припоя, кгс/см³.

Оптимальный зазор

$$0,005 \leq \Delta \leq 0,025 \text{ см.} \quad (36)$$

Вертикальная сторона галтели припоя y в тавровом соединении, а следовательно, и радиус галтели R определяются при достаточном количестве жидкой фазы по формуле

$$y = R = \sqrt{\frac{2\sigma_{12}}{\gamma}}. \quad (37)$$

Время заполнения припоем горизонтально расположенного шва протяженностью b подсчитывается следующим образом:

$$\tau = \frac{3\eta b^2}{\Delta \sigma_{12} \cos \theta}, \quad (38)$$

где τ — время, с; η — вязкость расплавленного припоя в момент заполнения зазора, П.

Средняя скорость продвижения фронта жидкого припоя определяется по тем же исходным данным:

$$\bar{v} = \frac{\Delta \sigma_{12} \cos \theta}{6b\eta}. \quad (39)$$

Условие теплового баланса. Процесс пайки возможен при условии, что количество тепла Q_p источника нагрева с учетом потерь q_n достаточно для расплавления припоя и нагревания изделия до температуры пайки t_2 . В общем виде условие теплового баланса может быть записано следующим образом:

$$Q_p - q_n = (m_1 c_1 + m_2 c_2) (t_2 - t_0) + \lambda m_2, \quad (40)$$

где m_1 и c_1 — масса и удельная теплоемкость металла; m_2 и c_2 — масса и удельная теплоемкость припоя; t_0 — начальная (комнатная) температура изделия и припоя; λ — удельная теплота плавления припоя.

Неизбежные потери тепла q_n связаны с нагреванием рабочего пространства (муфеля, контейнера, соляной ванны и т. п.), различных приспособлений (фиксаторы, стапели, индукторы), а также с радиационными потерями и др.

Для совместного решения выражения (40) с уравнениями и неравенствами температурного условия необходимо представить его в следующем виде:

$$t_2 - t_0 = \frac{Q_p - q_n - \lambda m_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}. \quad (41)$$

Величины Q_p и q_n обычно подбирают опытным путем применительно к имеющемуся оборудованию. Однако условие теплового баланса можно реализовать и расчетным путем, если ввести критерий экономичности f_3 для выбранного способа нагрева при пайке:

$$f_3 = \frac{(m_1 c_1 + m_2 c_2) (t_2 - t_0) + \lambda m_2}{Q_p}. \quad (42)$$

Получив числовые значения f_3 на основе обработки статистических данных, можно использовать их для расчетов, поскольку совместное решение выражений (40)—(42) приводит к удобному для этого виду

$$t_2 - t_0 = \frac{f_3 Q_p - \lambda m_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}. \quad (43)$$

Условие металлургического взаимодействия припоя с паяемым материалом. В процессе пайки, если соблюдено условие смачиваемости и растекаемости, наступает процесс металлургического взаимодействия расплавленного припоя с паяемым материалом. Характер и степень этого взаимодействия в значительной мере зависят от того, насколько легкоплавких или тугоплавких выбранный припой. Все попытки зарубежных и отечественных исследователей классифицировать припои на легкоплавкие и тугоплавкие по температуре их плавления, например при $t_3 \leq 425^\circ \text{C}$ мягкие или легкоплавкие, при $t_3 > 425^\circ \text{C}$ твердые или тугоплавкие, лишь затрудняют выяснение действительного характера взаимодействия припоя с паяемым материалом и нельзя считать удовлетворительными.

Для научной оценки ожидаемого взаимодействия припоя с паяемым материалом прежде всего необходимо сопоставить их абсолютные температуры плавления, т. е. вычислить критерий легкоплавкости припоя:

$$K_3 = \frac{T_3}{T_1}, \quad (44)$$

где T_3 и T_1 — температуры начала плавления припоя и паяемого материала, K .

Величина K_3 может изменяться в пределах от 0 до 1. Этот интервал следует расчленить на два: для легкоплавких и для тугоплавких, приняв границей между ними величину K_3 , соответствующую порогу рекристаллизации паяемого материала. Так, для чистых металлов, используемых в качестве конструкционных материалов, граничное значение $K_3 = 0,4$. Следовательно, легкоплавкими припоями для чистых металлов могут называться такие сплавы или чистые металлы, для которых соблюдается условие

$$0 < K_3 < 0,4, \quad (45)$$

а тугоплавкими — те припои, для которых

$$0,4 \leq K_3 \leq 1. \quad (46)$$

Следует заметить, что при такой классификации один и тот же припой может быть и легкоплавким и тугоплавким в зависимости от того, с каким материалом сопоставляется. Так, для железа с $t_1 = 1539^\circ \text{C}$ медь ($t_3 = 1083^\circ \text{C}$) характеризуется значением $K_3 = 0,75$ и, следовательно, является тугоплавким припоем. В то же время для вольфрама медь — легкоплавкий припой, поскольку в этом случае $K_3 = 0,37$.

Паяные соединения, выполненные легкоплавкими припоями, могут подвергаться неоднократной перепайке с разборкой, и потому их следует называть легкоразъемными, в то время как прочие соединения следует называть трудноразъемными. Это опровергает имеющееся в литературе мнение о пайке как способе создания неразъемных соединений, которое не отражает практических возможностей пайки и резко их ограничивает.

Введение критерия K_3 предопределяет выбор мягкого или жесткого режимов нагрева при пайке, характеризуемых скоростью нагрева

$$V_n = \frac{dT}{d\tau}. \quad (47)$$

Значение этого критерия может быть подобрано опытным путем или вычислено, например, по формуле

$$V_n = \frac{F}{C_n} [\alpha_{cp} (\tilde{T} - T) - \epsilon_{cp} \sigma_0 T^4]. \quad (48)$$

Логическая связь между критериями K_3 и V_n состоит в том, что если вычисленное значение K_3 , согласно формуле (44), удовлетворяет условию (46), то в этом случае необходимо назначить жесткий режим нагрева. Если же величина K_3 удовлетворяет условию (45), то допустимы и тот и другой режимы нагрева. Условная граница между этими режимами может быть принята на основе обработки статистических данных при $V_n = 10^\circ \text{C/мин}$ [1, 6, 39].

Существует также связь между режимами нагрева и интервалом кристаллизации припоя Δt_3 . При соблюдении условия

$$0 \leq \Delta t_3 \leq 50^\circ \quad (49)$$

допустимы и мягкий и жесткий режимы. При

$$\Delta t_3 > 50^\circ \quad (50)$$

рекомендуется жесткий режим нагрева, поскольку в противном случае имеется опасность получения некачественного соединения [6].

Связь критерия K_3 с коэффициентами K_1 и K_2 может быть установлена по формуле

$$K_3 = \frac{K_1 (t_4 + 273)}{K_2 (t_2 + 273 K_1)}. \quad (51)$$

Произведение коэффициентов

$$K_2 K_3 = K_4 \quad (52)$$

может быть найдено в соответствии с выражениями (4) и (44) в начале технологического проектирования по известным из технического задания величинам T_1 и T_4 , поскольку

$$K_4 = \frac{T_4}{T_1}, \quad (53)$$

где K_4 — гомологическая температура конструкционного материала, по которой вычисляют показатели высокотемпературной прочности.

При пайке происходит обменная диффузия между атомами припоя и основного металла, самодиффузия атомов, растворение основного металла в жидком припое, образование новых фаз и, в частности, химических соединений. Последующая кристаллизация сплава, образовавшегося в паяном шве, наиболее существенно влияет на свойства соединения.

Диффузию можно определить как кинетический процесс, связанный с выравниванием неодинаковых концентраций данного компонента в различных местах фазы, обусловленный молекулярным тепловым движением. Законы диффузии впервые установлены А. Фиком. Диффузионная подвижность металлов в твердых растворах сплавов подчиняется гомологическому закону диффузии [34]

$$-\lg D = 9 + 43 (1 - T_{\text{диф}}/T_{\text{пл}})^{2,8}, \quad (54)$$

где D — коэффициент самодиффузии металлов; $T_{\text{диф}}/T_{\text{пл}}$ — гомологическая температура для диффундирующего металла.

Согласно формуле (54) металлы, имеющие более низкую температуру плавления и, следовательно, меньшие силы межатомной связи, при одной и той же температуре, например, при $T_{\text{диф}} = T_2$, проявляют большую диффузионную подвижность. Металлы с более высокой температурой плавления $T_{\text{пл}}$ имеют меньшую диффузионную подвижность в растворе сплава. Отсюда могут быть сделаны выводы о возможности оценки упрочняющего и разупрочняющего влияния компонентов в зависимости от соотношения $T_{\text{пл}}$ растворителя (в данном случае T_1) и растворяемого материала, т. е. различных значений T_3 .

Скорости самодиффузии металлов в твердом состоянии $T < T_{\text{пл}}$ имеют общий порядок величин, определяемых $D = 10^{-8} \div 10^{-9}$ см²/с, тогда как в жидком состоянии при $T \approx T_{\text{пл}}$ скорости самодиффузии скачкообразно увеличиваются в 10^3 — 10^4 раз, т. е. до значений $D = 10^{-4}$ — 10^{-5} см²/с [21]. Известно также, что разница скоростей диффузии элементов в каком-либо металле и их самодиффузии в жидком состоянии меньше, чем в твердом.

Использование законов диффузии дает возможность аналитически решать некоторые проектно-технологические задачи пайки.

Так, в общем случае, когда скорость растворения металла в припое зависит одновременно и от скорости перехода атомов основного (твердого) металла в расплавленном припое, и от скорости диффузии в жидкой фазе, уравнение, описывающее кинетику растворения [29, 31], имеет вид

$$-\ln \left(1 - \frac{C}{C_{\infty}} \right) = \frac{\alpha \tau}{\Delta}, \quad (55)$$

где C — концентрация основного металла в расплавленном припое при t_2 , %; C_{∞} — концентрация насыщения расплавленного припоя основным металлом при t_2 , %; α — константа скорости растворения, см/с; τ — время, с; Δ — зазор в соединении под пайку, см.

Константа

$$\alpha = \frac{\omega_{\tau} \frac{\rho}{C_{\infty}} + \frac{D}{\delta}}{\frac{\omega_{\tau} \rho}{C_{\infty}} + D \delta}, \quad (56)$$

где ω_{τ} — вероятность перехода атомов основного металла в расплавленный припой; ρ — поверхностная плотность основного металла или число атомов на поверхности единичной площади; D — коэффициент диффузии атомов основного металла в жидком припое; δ — суммарная ширина пограничного слоя и диффузионной зоны со стороны припоя.

Ю. С. Долговым получены значения константы α для случаев пайки меди оловом, алюминия силумином, нихрома никель-кремниевым припоем и припоем системы никель — бор — кремний — молибден при $300 \leq t_2 \leq 1250^{\circ} \text{C}$ [9]. Установлено

что в рассмотренных случаях значение α изменяется от $0,9 \cdot 10^{-4}$ до $2,7 \cdot 10^{-4}$ см/с. Это позволяет представить зависимость (55) в виде номограммы (рис. 8).

Если в процессе диффузии между основным металлом и припоем образуется одно или несколько интерметаллических соединений в виде слоев, то каждый из них растет с различной скоростью. Для иллюстрации этого механизма можно использовать выражение первого закона диффузии Фика, которое после преобразований и интегрирования [22] имеет вид

$$x^2 = 2D \frac{\Delta c}{a} \tau, \quad (57)$$

где x — толщина слоя интерметаллида; Δc — разность концентрации на границах отдельного слоя интерметаллида при температуре t_2 ; a — коэффициент пропорциональности, имеющий ту же размерность, что и концентрация вещества.

Таким образом, согласно формуле (57) толщина слоя интерметаллического соединения x увеличивается в зависимости от времени выдержки τ при пайке по параболическому закону.

Выражение (57) можно использовать с известными допущениями для оценки перемещения в единицу времени атомов в жидком $x_{ж}$ и твердом $x_{тв}$ состоянии вблизи $T_{пл}$, приняв

$$\frac{x_{ж}}{x_{тв}} = \sqrt{\frac{D_{ж}}{D_{тв}}}. \quad (58)$$

При $D_{ж}/D_{тв} = 10^4$

$$x_{ж} = x_{тв} \cdot 10^2. \quad (59)$$

Рис. 8. Изменение относительной концентрации C/C_∞ в зоне сплавления в функции времени выдержки τ при температуре пайки $t_2 = 1200^\circ \text{C}$ и размеров зазора Δ (основной материал — нихром, припой системы никель — бор — молибден — кремний)

Для случая диффузионной пайки получена подобная выражению (57) зависимость [38]

$$\tau = \frac{\Delta^2}{4\beta^2 D}, \quad (60)$$

где τ — время выдержки при t_2 , с; Δ — зазор, см; β — безразмерная постоянная; D — коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$.

Значение β определяется из уравнения [10]

$$\beta + \frac{\beta^2}{\sqrt{\pi}} + \frac{\beta^3}{4} - \beta_0 = 0 \quad (61)$$

или по номограмме $\beta = f(\beta_0)$ [38]. Значение β_0 для различных случаев пайки можно найти по формуле

$$\beta_0 = \frac{2C_0}{\Delta C \sqrt{\pi}}, \quad (62)$$

где C_0 — растворимость металла — припоя в основном металле при t_2 ; ΔC — концентрационный интервал между ликвидусом и солидусом диаграммы состояния припой — основной металл при t_2 .

Поскольку D , C_0 и ΔC зависят от t_2 , то, следовательно, выражения (54)—(58) и (60)—(62) в неявной форме также зависят от t_2 , что открывает широкие возможности использования последних для проекторочных расчетов.

Для процесса диффузии в твердых фазах должны соблюдаться следующие условия: 1) малое различие в размерах атомных диаметров основного металла и ком-

понентов припоя, не превышающее 15—16%; 2) определенная растворимость припоя в конструкционном материале, что может быть выявлено по данным бинарных диаграмм состояния сплавов [7].

В общем случае толщина диффузионного слоя x в твердых телах в функции температуры и продолжительности процесса может быть определена по выражению [7]

$$x \doteq 2 \sqrt{A\tau} \exp \left(-\frac{B}{2T} \right), \quad (63)$$

где τ — время, с; T — температура, К; A и B — постоянные величины. Для определения последних обычно составляют два уравнения с известными значениями толщины слоев, получаемых экспериментально. После этого можно рассчитывать толщину диффузионных слоев, которые образуются при любых других режимах.

Так, например, если исследуется диффузия кремния в железо и известно, что при $\tau_1 = 3,6 \cdot 10^3$ с и $T_1 = 1223$ К толщина слоя $x_1 = 0,0072$ см, а при $\tau_2 = 14,4 \times 10^3$ с и $T_2 = 1323$ К $x_2 = 0,0265$ см, то при решении системы уравнений, согласно формуле (63), получим значения $A = 3,46 \cdot 10^{-2}$ и $B = 1,964 \cdot 10^4$, позволяющие всесторонне изучить взаимодействие кремния и железа при любых T и τ .

При пайке меди, латуни и мягкой стали припоями на оловянно-свинцовой основе установлена эмпирическая связь между зазором Δ и температурой пайки t_2 из условия получения максимальной прочности паяного соединения в виде [25]

$$t_2 = 183 + \frac{8,34^*}{\Delta}, \quad (64)$$

где Δ — зазор, мм; t_2 — температура пайки, °С.

Расчетная кривая для этого случая приведена на рис. 9, где точками нанесены также экспериментальные данные [17, 25]. Эту корреляцию можно считать законом для всех припоев, содержащих оловянно-свинцовую эвтектику [25].

Итак, выражение (64) подобно указанным выше удобно для совместного решения с количественными зависимостями при других условиях получения паяных соединений.

Условие технологичности. Технологичность — свойство конструкции, заложенное в ней при проектировании и позволяющее получить наиболее рациональными способами изделие с высокими эксплуатационными качествами при наименьших затратах материалов, средств и труда [42]. В качестве основных критериев технологичности паяных изделий целесообразно рассматривать совокупность характеристик: $K_{и.м}$, Θ и $C_{т.п.усл}^y$, где $K_{и.м}$ — коэффициент использования материала; Θ — общая трудоемкость изготовления изделия; $C_{т.п.усл}^y$ — удельная условная себестоимость технологических процессов с учетом стоимости конструкционного материала.

Значения критериев технологичности меняются с течением времени и, в частности, с возрастанием порядкового номера выпускаемого изделия. Для данного периода времени имеются основания записать для проектируемых паяных изделий, что

$$0,5 \leq K_{и.м} \leq 1. \quad (65)$$

Действительные значения $K_{и.м}$ можно рассчитать исходя из принятой формы заготовок.

В общем случае суммарную трудоемкость операций технологического процесса изготовления паяных изделий Θ можно представить в виде трудоемкостей следую-

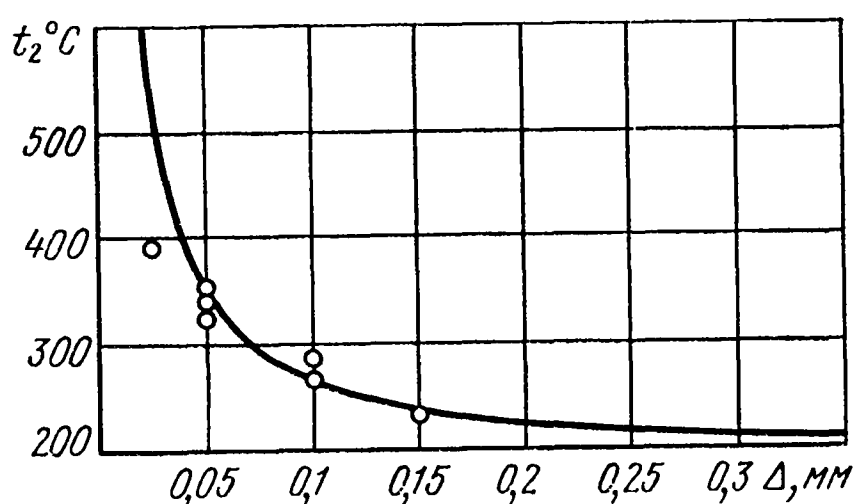


Рис. 9. Зависимость температуры пайки t_2 от размеров зазора Δ для оловянно-свинцовых припоев из условия получения максимальной прочности соединений

* В работах [17, 25] этот коэффициент ошибочно указан равным 0,34.

ших групп работ: заготовительных $\vartheta_{\text{заг}}$, механической обработки $\vartheta_{\text{мех}}$, слесарно-сборочных $\vartheta_{\text{сл.сб}}$, термических (пайка) $\vartheta_{\text{терм}}$ и заключительных $\vartheta_{\text{закл}}$ (контрольно-измерительных, малярных, а также испытаний). Тогда можно записать, что

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \vartheta_i, \quad (66)$$

или с учетом указанных групп

$$\Theta = \vartheta_{\text{заг}} + \vartheta_{\text{мех}} + \vartheta_{\text{сл.сб}} + \vartheta_{\text{терм}} + \vartheta_{\text{закл}}. \quad (67)$$

Разделив это равенство на Θ и введя

$$\xi_i = \frac{\vartheta_i}{\Theta}, \quad (68)$$

получим уравнение относительных трудоемкостей

$$1 = \sum_{i=1}^n \xi_i = \xi_{\text{заг}} + \xi_{\text{мех}} + \xi_{\text{сл.сб}} + \xi_{\text{терм}} + \xi_{\text{закл}}. \quad (69)$$

Чтобы проанализировать, какими же факторами следует воспользоваться для наибольшего сокращения трудоемкости, необходимо установить зависимости отдельных составляющих ξ_i от влияющих на них параметров:

$$\left. \begin{aligned} \xi_{\text{заг}} &= f(a_f, b_f, \dots); \\ \xi_{\text{мех}} &= \varphi(a_\varphi, b_\varphi, \dots); \\ \xi_{\text{сл.сб}} &= \chi(a_\chi, b_\chi, \dots); \\ \xi_{\text{терм}} &= \psi(a_\psi, b_\psi, \dots); \\ \xi_{\text{закл}} &= \zeta(a_\zeta, b_\zeta, \dots). \end{aligned} \right\} \quad (70)$$

После подстановки этих значений в уравнение (69) получим уравнение состояния производства паяных изделий [2]

$$1 = f(a_f, b_f, \dots) + \varphi(a_\varphi, b_\varphi, \dots) + \chi(a_\chi, b_\chi, \dots) + \psi(a_\psi, b_\psi, \dots) + \zeta(a_\zeta, b_\zeta, \dots). \quad (71)$$

По значениям частных производных $\frac{\partial f}{\partial a_f}, \frac{\partial f}{\partial b_f} \dots$ можно судить о степени влияния изменений $a_f, b_f \dots$ на f , а по произведению $\delta a_f \frac{\partial f}{\partial a_f}, \delta b_f \frac{\partial f}{\partial b_f} \dots$ — о степени изменения f при изменении аргументов $a_f, b_f \dots$ на величину $\delta a_f, \delta b_f \dots$. Таким образом, в результате изменения, например, a_f на величину δa_f первое слагаемое уравнения состояния производства при усовершенствовании технологии равно

$$f_1 = \left(f - \delta a_f \frac{\partial f}{\partial a_f} \right) < f, \quad (72)$$

так как в случае снижения трудоемкости производная $\frac{\partial f}{\partial a_f}$ отрицательная.

Поскольку $f - f_1 = \delta a_f \frac{\partial f}{\partial a_f} = \delta f$ или $f - \delta f = f_1$, то уравнение (71) можно записать в виде

$$1 - \delta f = f_1 + \varphi + \chi + \psi + \zeta. \quad (73)$$

Поделив каждый член полученного уравнения на его левую часть, имеем

$$1 = \frac{f_1}{1 - \delta f} + \frac{\varphi}{1 - \delta f} + \frac{\chi}{1 - \delta f} + \frac{\psi}{1 - \delta f} + \frac{\zeta}{1 - \delta f}. \quad (74)$$

Отсюда видно, что при изменении одного из слагаемых меняется величина и всех остальных, т. е. происходит перераспределение значимости слагаемых. Следо-

вательно, при некотором усовершенствовании работ одной группы работы другой группы становятся наиболее трудоемкими и нуждаются в дальнейшем усовершенствовании. Поэтому уравнение состояния производства открывает неограниченные возможности для исследования весомости усовершенствований любого из технологических факторов и оценки влияния каждого из них на все остальные.

Расчет удельной себестоимости технологических процессов $C_{т.п.усл}^y$ зависит от размеров серии, которая обычно указывается в техническом задании. При моделировании целесообразно сопоставить этот фактор с оптимальной удельной себестоимостью $C_{опт}^y$, достижимой при среднестатистических затратах труда и при обеспечении заданных технико-экономических требований, т. е. следует стремиться к обеспечению условия

$$C_{т. п. усл}^y \leq C_{опт}^y. \quad (75)$$

Условие прочности. Во всем диапазоне эксплуатационных температур прочность паяных соединений должна быть достаточной для восприятия нагрузок или равной прочности конструкционного материала.

Для паяных соединений встык условие прочности можно записать в виде

$$\sigma_{доп}^{T_4} F_0 = P_{\varepsilon}^{T_4}, \quad (76)$$

где $\sigma_{доп}^{T_4}$ — допускаемое напряжение паяного шва (припоя) при расчетной температуре T_4 , кгс/мм²; F_0 — площадь соединения, мм²; $P_{\varepsilon}^{T_4}$ — эксплуатационная нагрузка при расчетной температуре, кгс.

Если ввести коэффициент безопасности

$$f_0 = \frac{\sigma_{в}^{T_4}}{\sigma_{доп}^{T_4}}, \quad (77)$$

который обычно равен 1,25—1,35, то выражение (76) можно записать в более удобном для расчетов виде

$$\sigma_{в}^{T_4} = f_0 \frac{P_{\varepsilon}^{T_4}}{F_0}, \quad (78)$$

где $\sigma_{в}^{T_4}$ — предел прочности паяного шва (припоя) при температуре T_4 , кгс/мм².

Применив для этих условий данные работы [42], получим следующее выражение для этого показателя:

$$\sigma_{в}^{T_4} = 0,0394 A_0 T_3 \exp \left(-4,866 \frac{T_4}{T_3} \right), \quad (79)$$

где T_3 — температура начала плавления припоя, К; A_0 — коэффициент.

Решая совместно выражения (78), (79) и (4), получим общий вид условия прочности для паяных соединений встык:

$$f_0 P_{\varepsilon}^{T_4} = 0,0394 A_0 F_0 T_3 \exp (-4,866 K_2). \quad (80)$$

Нетрудно видеть, что выражение (80) может быть использовано для совместных решений с выражениями (51) и (52).

Паяные соединения внахлестку целесообразно рассчитывать из условия равнопрочности

$$a \tau_{ср}^{T_4} = c \left(\sigma_{в}^{T_4} \right)_p, \quad (81)$$

где a — длина нахлестки в паяном соединении, мм; c — толщина конструкционного материала, мм; $\tau_{ср}^{T_4}$ — прочность паяного соединения (припоя) на срез при тем.

пературе T_4 , кгс/мм²; $(\sigma_B^{T_4})_p$ — предел прочности конструкционного материала при той же температуре с учетом разупрочнения в результате пайки, кгс/мм² [44].

Показатели прочности, входящие в выражение (81), обычно получают экспериментальным путем. Однако при моделировании для этой цели могут быть использованы зависимости

$$\tau_{cp}^{T_4} = 0,0394 \varphi A_0 T_3 \exp(-4,866 K_2), \quad (82)$$

где $\varphi = 0,6 \div 0,7$, а остальные величины — по аналогии с выражением (79) и

$$(\sigma_B^{T_4})_p = 0,0394 A_1 T_1 \exp(-4,866 K_4), \quad (83)$$

где T_1 — температура начала плавления конструкционного материала, К; A_1 — коэффициент, определяемый по аналогии с A_0 ; $K_4 = T_4/T_1$.

После подстановки (82) и (83) в (81) и преобразований с учетом выражения (52) получим

$$\bar{a} = \frac{a}{c} = \frac{A_1 K_2}{\varphi A_0 K_4} e^{4,866 (K_2 - K_4)}, \quad (84)$$

где $\bar{a}$ — относительная нахлестка.

Полученное в общем виде условие равнопрочности паяных соединений внахлестку оказывается вполне удовлетворительным, если

$$2 \leq \bar{a} \leq 10, \quad (85)$$

что хорошо согласуется с технологическими особенностями паяных соединений внахлестку.

Зависимость (84) также может быть использована для совместных решений

с выражениями (5), (51), (52) и (85). Графически она представлена на рис. 10 при условии, что $\varphi = 0,65$ и $A_0 = A_1$.

Влияние температуры пайки t_2 на прочность изделия особенно заметно в случае применения термообрабатываемых материалов. Эффект разупрочнения зависит от степени рассогласования режимов пайки и термообработки, а также от степени термоупрочнения сплава [42].

Эффект разупрочнения при пайке деталей из алюминиевых сплавов (при охлаждении на воздухе) можно оценить по выведенным на основе обработки экспериментальных данных [42] формулам:

для сплавов типа АМц и АЛ4 при $480 \leq t_2 \leq 540^\circ \text{C}$

$$(\sigma_B^{293})_p \geq 0,25 (3\sigma_B^m + \sigma_B^0); \quad (86)$$

для сплавов типа Д16АТ и АК6 при $480 \leq t_2 \leq 520^\circ \text{C}$

$$(\sigma_B^{293})_p \geq 0,5 (\sigma_B^m + \sigma_B^0), \quad (87)$$

где $(\sigma_B^{293})_p$ — предел прочности сплава при $T_4 = 293 \text{ K}$, разупрочненного частичным отжигом при пайке, кгс/мм²; σ_B^m — предел прочности сплава (при той же температуре) в исходном состоянии, т. е. термоупрочненного закалкой и старением, кгс/мм²; σ_B^0 — предел прочности сплава в отожженном состоянии.

Совместное влияние температуры пайки t_2 °С и эксплуатационной температуры T_4 К на предел прочности $\sigma_B^{T_4}$ сплава Д16АТ ($T_{пл} = T_1 = 830 \text{ K}$) показано на рис. 11, где точками нанесены экспериментальные данные, а линиями — результаты расчета по формуле (83). Значение коэффициента A_1 в выражении (83) опреде-

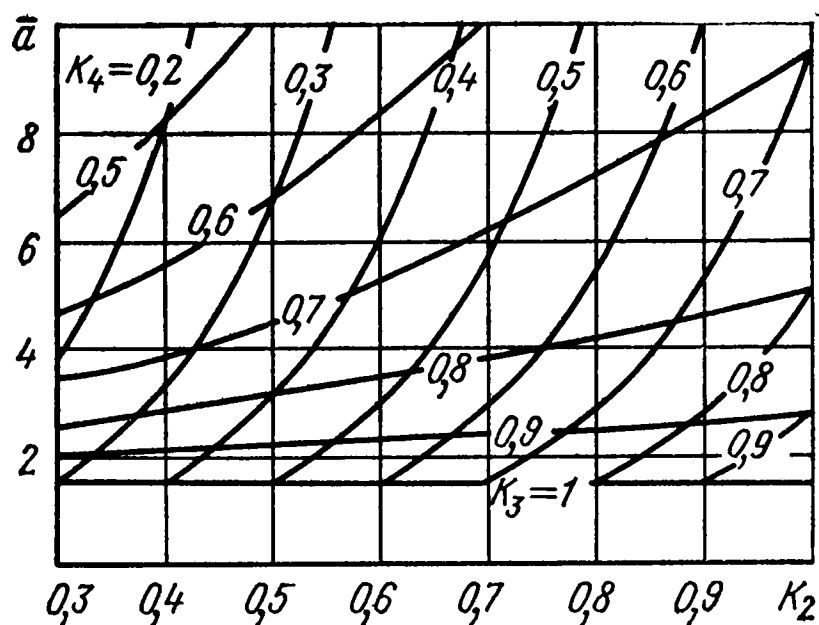


Рис. 10. Зависимость относительной нахлестки $\bar{a}$ от коэффициентов K_2 , K_3 и K_4

лено в функции гомологической температуры $K_4 = T_4/T_1$ и представлено графически для различных температур пайки t_2 (рис. 12). Необходимо подчеркнуть, что семейство прямых в области $K_4 < 0,6$ имеет общую точку пересечения с координатами $K_4 = -1$ и $\ln A_1 = -2,64$.

Эти координаты вычислены путем совместного решения двух уравнений

$$\ln A_1 = 0,86 + 3,5K_4 \quad \text{и} \quad \ln A_1 = 0,46 + 3,1K_4, \quad (88)$$

выражающих линейную зависимость $\ln A_1(K_4)$ для сплава Д16АТ в исходном (термообработанном) и соответственно в наиболее разупрочненном (в результате пайки)

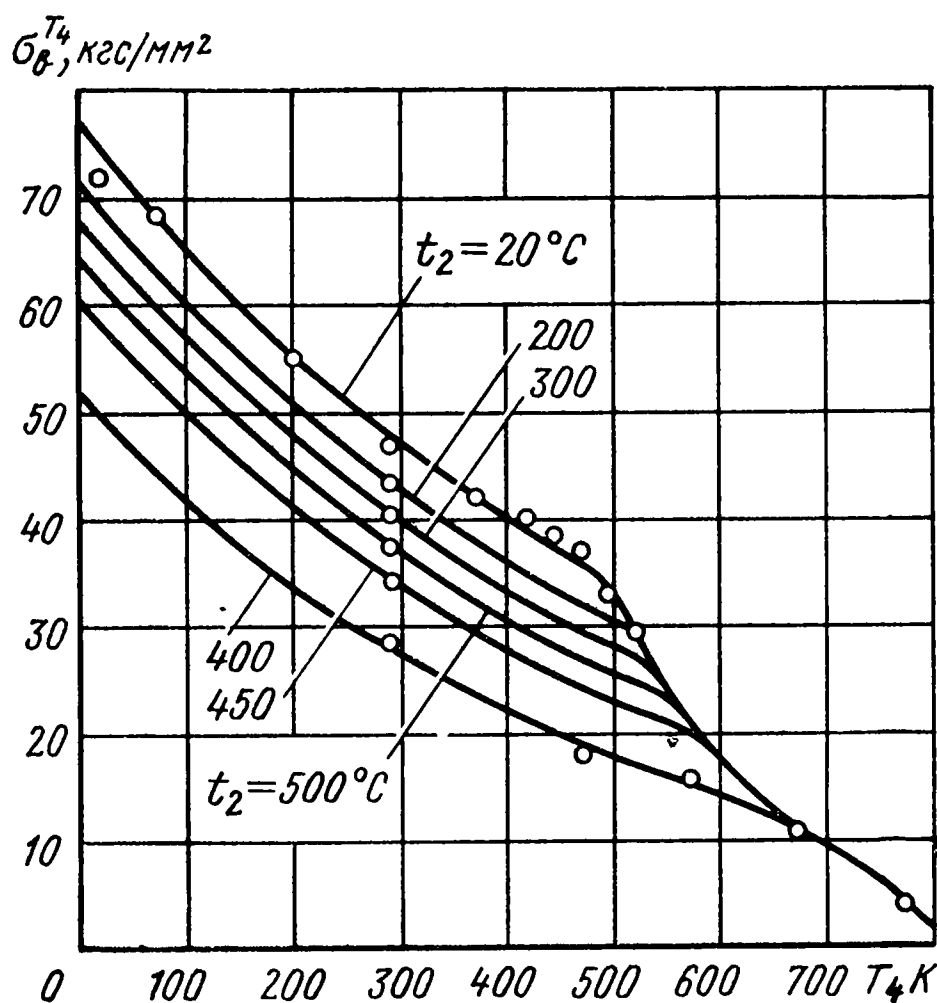


Рис. 11. Зависимость предела прочности сплава Д16АТ от температуры пайки t_2 °С и эксплуатации T_4 К

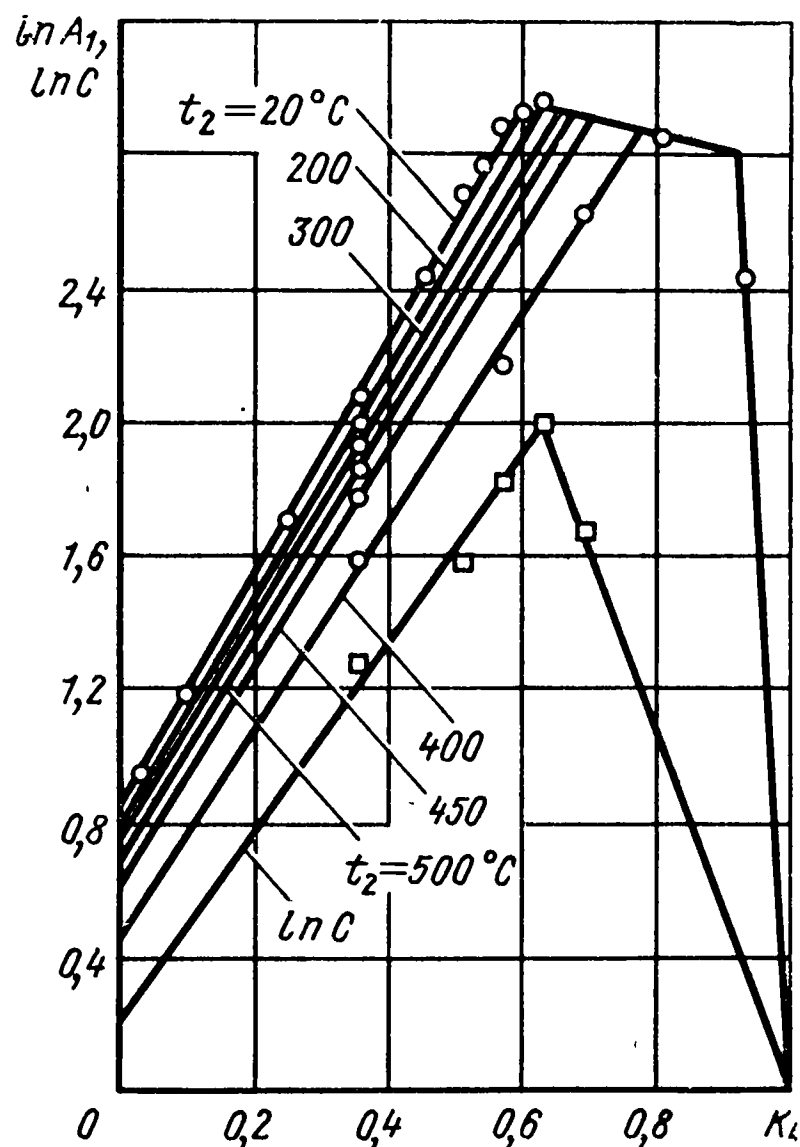


Рис. 12. Влияние гомологической температуры K_4 на коэффициенты A_1 и C

состоянии. Прямые, характеризующие зависимость (88), выбраны как самые достоверные, поскольку при их построении использовано наибольшее количество экспериментальных данных из общего числа, имеющегося в распоряжении. Остальные прямые на рис. 12 построены с учетом выявленной общей точки.

Зависимости $A_1(K_4)$ для различных температур пайки приведены в табл. 1. В области значений $0,95 \leq K_4 \leq 1$

$$A_1 = \exp(56 - 56K_4). \quad (89)$$

Итак, выражения (86)—(89) и приведенные в табл. 1 зависимости могут быть использованы при расчетах согласно формулам (81), (83) и (84).

Условие выносливости. Способность материала конструкции, в том числе и паяных соединений, сопротивляться усталостному разрушению получила название выносливости. Это свойство обычно оценивается пределом выносливости или числом циклов, необходимых для разрушения при некотором значении амплитуды напряжений, превышающем предел выносливости [18].

Условие выносливости паяного изделия соблюдается, если во всем диапазоне эксплуатационных температур T_4 справедливы соотношения

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a(T_4) &\leq \sigma_w(T_4, N) \\ \sigma_a^*(T_4) &\leq \sigma_w^*(T_4, N^*), \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

где σ_a и σ_a^* — переменные напряжения усталостного цикла нагружения, или амплитуда циклических напряжений в материале конструкции и соответственно в паяном соединении, кгс/мм²; σ_w и σ_w^* — пределы выносливости материала конструкции и соответственно паяного соединения, работающих преимущественно на изгиб, кгс/мм²; N и N^* — числа циклов до разрушения, на базе которых определяются пределы выносливости.

1. Зависимость коэффициента A_1 от K_4 и температуры пайки

Температура пайки, °C	Формулы для расчета $A_1 (K_4)$			
	$A_1 (K_4)$	K_4	$A_1 (K_4)$	K_4
20	$A_1 = \exp (0,86 + 3,5K_4)$	0—0,60	$A_1 = \exp (3,234 - 0,457K_4)$	0,60—0,95
200	$A_1 = \exp (0,79 + 3,43K_4)$	0—0,63		0,63—0,95
300	$A_1 = \exp (0,74 + 3,38K_4)$	0—0,65		0,65—0,95
400	$A_1 = \exp (0,46 + 3,1K_4)$	0—0,77		0,77—0,95
450	$A_1 = \exp (0,62 + 3,26K_4)$	0—0,70		0,70—0,95
500	$A_1 = \exp (0,685 + 3,325K_4)$	0—0,67		0,67—0,95

При этом имеется в виду, что в общем случае справедливы следующие выражения:

$$\sigma_a (T_4) \neq \sigma_a^* (T_4); \quad \sigma_w (T_4, N) \neq \sigma_w^* (T_4, N^*) \quad \text{и} \quad N \neq N^*. \quad (91)$$

Необходимая при моделировании связь между допустимыми значениями σ_a (или σ_a^*) и σ_B при умеренных температурах может быть установлена с помощью приближенной формулы [45]:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_B} = \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right) [A_B + \gamma_B (1 - A_B)], \quad (92)$$

где σ_B — предел прочности при растяжении, кгс/мм²; σ_m — среднее напряжение усталостного цикла нагружения, т. е. полусумма максимального $\sigma_{\max}$ и минимального $\sigma_{\min}$ напряжений в конструкции, кгс/мм²; A_B и γ_B — коэффициенты, зависящие от природы материала или паяного шва и параметров нагружения.

Расчеты по формуле (92) могут производиться (при отсутствии концентраторов напряжений) при следующих значениях коэффициентов A_B и γ_B [45]:

для сталей

$$A_B = \frac{1 + 0,0038n^4}{1 + 0,008n^4} \quad \text{и} \quad \gamma_B = \frac{\sigma_m \left(2 + \frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)}{3\sigma_B}; \quad (93)$$

для алюминиевых сплавов

$$A_B = \frac{1 + \frac{0,0031n^4}{1 + 0,064\sigma_B}}{1 + 0,0031n^4} \quad \text{и} \quad \gamma_B = \frac{\sigma_m}{\sigma_B \left(1 + \frac{n\sigma_B}{225}\right)^4}, \quad (94)$$

где

$$n = \lg N, \quad (95)$$

причем обычно

$$10^5 \leq N \leq 10^8 \quad \text{и} \quad 5 \leq n \leq 8. \quad (96)$$

Для некоторых изделий граничные значения N можно снизить на один порядок, т. е. принять

$$10^4 \leq N \leq 10^7 \quad \text{и} \quad 4 \leq n \leq 7. \quad (97)$$

Величины σ_a и σ_m связаны коэффициентом асимметрии цикла R , под которым понимают отношение минимального напряжения к максимальному:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}. \quad (98)$$

При симметричном цикле, когда $\sigma_m = 0$, и согласно формуле (98) $R = -1$, предел выносливости σ_w (или σ_w^*) обозначается σ_{-1} (или σ_{-1}^*).

Предел выносливости σ_{-1} и σ_{-1}^* для различных конструкционных материалов и паяных соединений определяют главным образом экспериментально [18, 45]. Однако имеются многочисленные рекомендации по расчету σ_{-1} с использованием известных механических свойств и теплофизических констант материалов, таких как предел прочности (92), предел текучести, твердость, теплота и температура плавления и др. [23, 45].

В результате анализа указанных литературных источников и оценки характера связи между пределом выносливости и пределом прочности материалов с учетом изменения температуры установлено следующее.

1. При комнатной температуре ($T_4 = 293$ К) отношение предела прочности к пределу выносливости, т. е. величина

$$C = \frac{\sigma_B}{\sigma_{-1}}, \quad (99)$$

изменяется для разных сплавов в широких пределах, а именно от 1,67 до 3,7. Однако для всех сталей, температура начала плавления которых достаточно стабильна ($T_1 = 1720 \pm 50$ К), при комнатной температуре, т. е. при $K_4 = 0,165 \div 0,175$, $C = 2$.

2. При температуре ниже комнатной, т. е. при $K_4 < 0,165$, значение C для сталей несколько снижается.

3. С повышением температуры предел выносливости сталей и других сплавов, как и при комнатной температуре, довольно тесно связан с пределом прочности при растяжении, причем значение C сначала возрастает, достигая максимума при $K_4 > 0,5$, а затем снижается, приближаясь к единице при $K_4 \rightarrow 1$.

Эти положения позволяют рассматривать критерий C для разных сплавов при одинаковых гомологических температурах K_4 , полагая, что при $K_4 = 1$ $C = 1$.

С этой целью систематизированные экспериментальные данные о σ_{-1} и σ_B при температурах от -196 до $+800^\circ$ С для девяти марок нержавеющей и жаропрочных сталей, приведенные в приложении к работе [43], подвергнуты математической обработке. Для этого класса сталей принято $T_4 = 1673$ К. Пересчет значений σ_{-1} с базы $N = 10^8$ на базу $N = 10^6$, выбранную в качестве основы для сравнения указанных сталей, производили по формулам:

в области $300 \leq t_4 \leq 600^\circ$ С, т. е. при $K_4 \leq 0,521$,

$$\lg N = 73,4 - 40 \lg \sigma_{-1}, \quad (100)$$

а в области $700 \leq t_4 \leq 800^\circ$ С, т. е. при $0,581 \leq K_4 \leq 0,642$,

$$\lg N = 31,4 - 16,1 \lg \sigma_{-1}. \quad (101)$$

Результаты этой обработки приведены в табл. 2, а график зависимости $\ln C = f(K_4)$ — на рис. 13. В данном случае возможна линейная аппроксимация, причем наблюдаются характерные переломы в низкотемпературной ($K_4 < 0,2$) и высокотемпературной ($K_4 > 0,5$) областях, что хорошо согласуется с аналогичными переломами на кривых прочности и твердости, зафиксированных рядом авторов для тугоплавких металлов.

На основе этого графика, как и при определении коэффициента A , получаем следующие зависимости:

$$\left. \begin{aligned} C &= \exp(0,5 + 0,81K_4) && \text{при } 0 \leq K_4 \leq 0,175; \\ C &= \exp(0,62 + 0,12K_4) && \text{при } 0,175 \leq K_4 \leq 0,581; \\ C &= \exp(1,65 - 1,65K_4) && \text{при } 0,581 \leq K_4 \leq 1. \end{aligned} \right\} \quad (102)$$

Результаты проверки справедливости зависимостей (102) и (99) для американских (304, 322 и 448) и отечественных сталей, а также для никелевого сплава ХН62МВКЮ в широком диапазоне температур приведены в табл. 3. Экспериментальные данные для этих целей заимствованы из работ [14, 18, 43].

2. Результаты обработки экспериментальных данных ($T_1 = 1673 \text{ K}$, $N = 10^6$)

$t_4, ^\circ\text{C}$	T_4, K	K_4	$C = \frac{\sum_{i=1}^{m=6} C_i}{m}$	$\ln C$
-196	77	0,046	1,73	0,5481
-78	195	0,117	1,77	0,5710
+20	293	0,175	1,90	0,6419
300	573	0,342	1,98	0,6831
400	673	0,402	1,87	0,6259
500	773	0,462	1,93	0,6575
600	873	0,521	2,00	0,6931
700	973	0,581	2,02	0,7031
800	1073	0,642	1,80	0,5878
1400	1673	1,000	1,00	0,0000

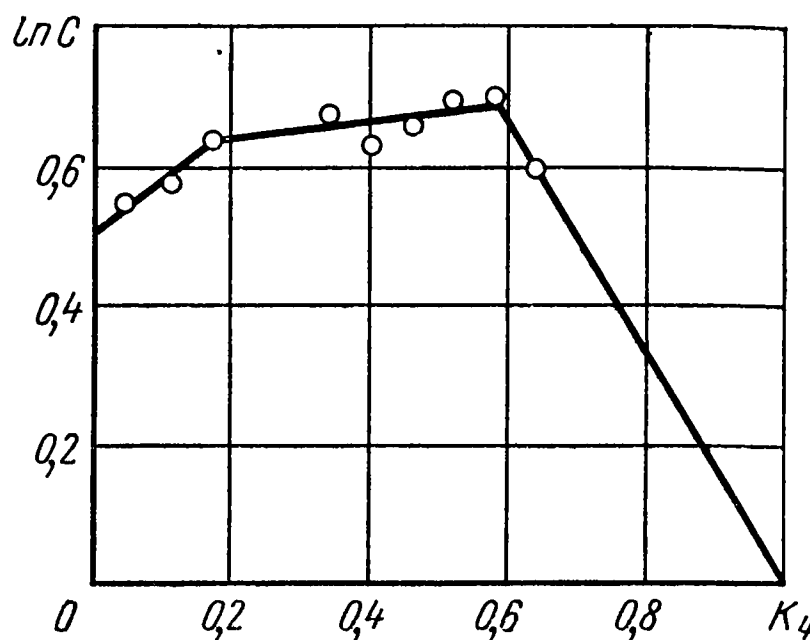


Рис. 13. Зависимость $\ln C$ от K_4 для нержавеющей и жаропрочных сталей

Как видно из табл. 3, в 90% случаев расчета по полученным формулам имеются ошибки не более $\pm 15\%$, что можно признать вполне удовлетворительным для поставленных целей.

С учетом вышеизложенного для моделирования условия выносливости можно рекомендовать следующий общий метод восполнения недостающей информации

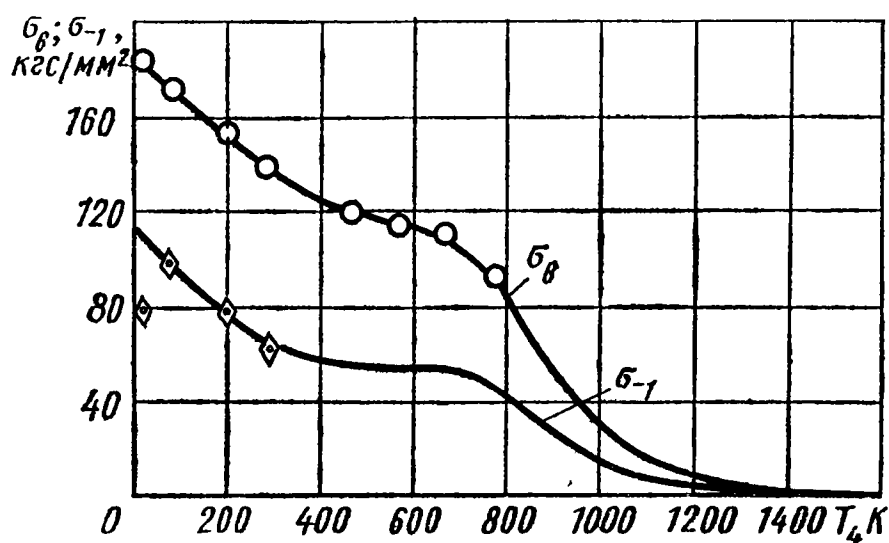


Рис. 14. Зависимость предела прочности и предела выносливости ($N = 10^6$) стали Х15Н8Ю (СН2) от температуры по данным эксперимента и расчета

о пределе выносливости. Если для заданного сплава требуется выяснить непрерывную температурную зависимость $\sigma_{-1}(T_4)$ или $\sigma_{-1}^*(T_4)$, когда известны лишь отдельные экспериментальные значения σ_{-1} , полученные на некоторой базе N , то необходимо сопоставить их со значениями $\sigma_B^{T_4}$ по формуле (99) при соответствующих гомологических температурах и определить зависимость $\ln C = f(K_4)$ по аналогии с изложенными приемами (см. табл. 2, рис. 12 и 13).

Проверка этого общего метода проведена на примере анализа свойств стали 09Х15Н8Ю. Экспериментальные

значения σ_B и σ_{-1} на базе 10^6 заимствованы из работы [18]. Для расчета зависимостей $\sigma_B^{T_4}$ и $\sigma_{-1}^{T_4}$ при принятом значении $T_1 = 1723 \text{ K}$ получены следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \exp(1,02 + 3,08K_4) & \text{при } 0 \leq K_4 \leq 0,170; \\ A_1 &= \exp(8,96K_4) & \text{при } 0,170 \leq K_4 \leq 0,275; \\ A_1 &= \exp(2,0 + 1,68K_4) & \text{при } 0,275 \leq K_4 \leq 0,430; \\ A_1 &= \exp(4,77 - 4,77K_4) & \text{при } 0,430 \leq K_4 \leq 1,0; \\ C &= \exp(0,5 + 1,56K_4) & \text{при } 0 \leq K_4 \leq 0,170; \\ C &= \exp(0,8 - 0,18K_4) & \text{при } 0,170 \leq K_4 \leq 0,581; \\ C &= \exp(1,66 - 1,66K_4) & \text{при } 0,581 \leq K_4 \leq 1,0. \end{aligned} \right\} \quad (103)$$

Совместное решение выражений (83), (99) и (103) представлено искомыми кривыми на рис. 14. Точками здесь обозначены соответствующие экспериментальные

данные. Смещение одной точки ($T_4 = 21\text{ К}$) объясняется известной аномалией свойств стали 09Х15Н8Ю в области, близкой к абсолютному нулю.

Условие пластичности. Наиболее распространенной характеристикой пластичности является относительное удлинение материала при разрушении δ .

3. Расчетные и экспериментальные значения предела выносливости для нержавеющих и жаропрочных сталей

Марка стали	T_4 , К	K_4	Эксперимент			Расчет по формулам (99) и (102)	Ошибка, $\pm x$, %
			$\sigma_{\text{в}}^{T_4}$, кгс/мм ²	$\sigma_{-1}^{T_4}$, кгс/мм ²			
				$N = 10^7$	$N = 10^6$	$\sigma_{-1}^{T_4}$, кгс/мм ²	
304	293	0,175	147,5	—	78,5	77,7	—1,0
	195	0,117	170,0	—	88,0	93,7	+6,5
	77	0,046	211,0	—	107,0	123,0	+14,0
322	293	0,175	127,0	—	66,0	66,8	+1,2
	195	0,117	140,0	—	86,5	77,3	—10,6
	77	0,046	170,0	—	113,0	99,3	—12,1
448	293	0,175	105,0	49,5	56,0	55,3	—1,3
	573	0,342	89,5	40,1	45,3	46,1	+1,8
	673	0,402	88,0	35,3	39,8	45,1	+13,3
	773	0,462	76,0	27,4	31,0	38,7	+24,8
	873	0,521	57,0	21,2	24,0	28,6	+19,2
2Х13	293	0,175	71,1	37,5	40,5	37,4	—7,7
	573	0,342	65,7	27,7	31,3	33,8	+8,0
	773	0,462	53,4	25,5	28,8	27,2	—5,6
	823	0,491	45,5	19,5	22,0	23,1	+5,0
12Х18Н9Т	293	0,175	54,0	25,0	25,0	28,4	+13,6
13Х14Н3В2ФР (ЭИ736)	773	0,462	92,0	48,3	54,8	46,9	—14,4
1Х12Н2ВМФ (ЭИ961)	823	0,491	80,0	42,2	45,8	40,6	—11,3
ХН62МВКЮ	1173	0,702	56,0	28,5	33,0	34,2	+3,6
Х13Н3ВФЛ	293	0,175	90,0	41,5	46,8	47,4	+1,3
	673	0,402	78,0	33,0	37,2	40,0	+7,5
	823	0,491	52,0	29,0	29,0	26,4	—9,0

Минимально допустимым относительным удлинением для материалов современных конструкций можно считать

$$\delta_{\text{доп}} \geq 1, \div 5\%.$$

(104)

Это требование необходимо предъявлять и к паяным соединениям. Однако, как показывает опыт, в тех случаях, когда жесткость паяных соединений выше жесткости элементов конструкции, например в соединениях внахлестку из тонколистовых материалов, допустимое относительное удлинение материала шва $\delta_{\text{доп}}^*$ может быть несколько меньше и составлять

$$\delta_{\text{доп}}^* \geq 0,5 \div 1\%.$$

(105)

Относительное удлинение определяют экспериментально. Наряду с этим предлагаются расчетные методы определения δ .

Так, Г. К. Щербак рекомендует формулу [48]

$$\delta_5 = k \frac{a_H}{\sigma_B}, \quad (106)$$

где δ_5 — относительное удлинение, определяемое при отношении длины образца к диаметру, равном 5; k — коэффициент, зависящий от природы материала; a_H — ударная вязкость, кгс·м/см²; σ_B — предел прочности, кгс/мм².

Выражение (106) справедливо для конструкционных сталей в области умеренных температур. Установлено, что коэффициент k связан с ударной вязкостью стали выражением [48]

$$k = \frac{k_0}{a_H}, \quad (107)$$

где k_0 — константа, характеризующая особенности той или иной марки стали. В частности, для стали 20 $k_0 = 1200$, для стали 40Х $k_0 = 1500$.

В общем случае относительное удлинение связано со средней скоростью ползучести $\dot{\epsilon}$ (%/ч) и временем до разрушения τ (ч) соотношением [41]

$$\delta = \dot{\epsilon} \tau. \quad (108)$$

В свою очередь, $\dot{\epsilon}$ зависит от напряжения σ и температуры T_4 и может быть выражена формулой [8, 41]

$$\dot{\epsilon} = \sigma_0 \sigma^n, \quad (109)$$

где σ_0 и n — коэффициенты, зависящие от температуры и природы сплава.

При подстановке выражения (109) в формулу (108) получаем

$$\delta = \sigma_0 \tau \sigma^n. \quad (110)$$

В диапазоне температур от 500 до 800°С показатель степени n для перлитных и аустенитных сталей изменяется от 4,6 до 15,5 [41]. В частности, для стали Х16Н25М6 при 700°С $n = 9$ и $\sigma_0 = 10^{-13}$ [мм²·%/кг·ч], поэтому в этом случае выражение получает вид

$$\delta = 10^{-13} \tau \sigma^9;$$

отсюда следует, что, например, при $\sigma = 15$ кгс/мм² и $\tau = 600$ ч $\delta = 2,4\%$, что означает возможность хрупкого разрушения деталей. При $\sigma = 38$ кгс/мм² и $\tau = 1$ ч $\delta = 15,8\%$, что свидетельствует о достаточной пластичности сплава и отсутствии опасности хрупкого разрушения.

С повышением температуры показатель степени n заметно снижается, что, согласно формуле (110), означает уменьшение пластичности и возможность хрупкого разрушения при сравнительно высоких скоростях ползучести или при малой продолжительности эксплуатации изделия.

Зная характер зависимости n и σ_0 от T_4 , можно произвести учет влияния последней в соответствии с формулой (110) на относительное удлинение и дать количественную оценку, согласно выражениям (105) и (104), принятому конструктивно-технологическому решению для соблюдения условия пластичности.

Условие коррозионной стойкости и старения. С течением времени под действием агрессивных сред прочность паяных соединений изменяется. Если эти изменения происходят с той же или меньшей интенсивностью, что и в материале конструкции, то можно считать их приемлемыми.

Используя выражение (81), условие коррозионной стойкости можно записать в следующем виде:

$$\left| \frac{d\varphi}{d\tau} \right| - \left| \frac{d\psi}{d\tau} \right| \geq 0; \quad \varphi = \varphi[W, \tau, (\sigma_B^{T_4})_p]; \quad \psi = \psi[W, \tau, \tau_{cr}^{T_4}], \quad (111)$$

где ϕ и ψ — характеристики разупрочнения конструкционного материала и соответственно паяных соединений; W — фактор, характеризующий природу окружающей среды; τ — время.

Для изделий, работающих при повышенных температурах в окислительной среде, согласно формуле (111) должна быть проверена прежде всего сопротивляемость паяных швов газовой коррозии. Изучение кинетики окисления металлов и сплавов показывает, что скорость их окисления во времени определяется линейной, параболической или логарифмической зависимостью и соответственно выражается следующими уравнениями [13, 19, 47]:

$$g = k_1 \tau; \quad (112)$$

$$g^2 = k_2 \tau; \quad (113)$$

$$g = k_3 \lg(\alpha \tau + 1), \quad (114)$$

где g — количество вступившего в реакцию кислорода; τ — продолжительность процесса окисления; k_1 , k_2 , k_3 и α — константы.

Константы k_i характеризуют скорость процесса окисления, являются основными его параметрами и определяются экспериментально. Для большинства процессов окисления металлов и сплавов эти константы определяют по уравнению Аррениуса

$$k = A_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT_4}\right), \quad (115)$$

где A_0 — постоянная; Q — энергия активации реакции окисления; R — газовая постоянная; T_4 — эксплуатационная температура.

Наилучшими защитными свойствами обладает окисная пленка на металлах и сплавах, процесс окисления которых происходит по логарифмическому закону (114). В этом случае на поверхности металла образуется только один окисел постоянного состава; окисная пленка плотная и непроницаемая. Диффузия атомов металла или кислорода через такую пленку затруднена. Пленка практически защищает металл от дальнейшего окисления [47].

По логарифмическому закону окисляется медь при температуре ниже 140°C , железо — ниже 200°C , цинк — ниже 225°C , марганец при температуре ниже 290°C . Подобным образом окисляются многие жаростойкие стали и сплавы. Так, например, сталь X25H16Г7АР (ЭИ835) окисляется при $T_4 = 1273 \text{ K}$ по уравнению

$$\Delta g = 2,3 \lg \tau - 0,41, \quad (116)$$

где Δg — привес материала, г/м²; τ — время, мин.

Полагая, что преобладающей фазой в последнем случае будет двойной окисел типа шпинели FeCr_2O_4 [13] с соотношением масс металлов и кислорода 2,5 : 1, можно показать, что, например, за время $\tau = 10$ мин расчетная толщина элементов изделия из стали X25H16Г7АР (ЭИ835), согласно формуле (116), уменьшится на 1,3%. Но если учесть, что с повышением температуры T_4 до 1673 К скорость окисления возрастает в несколько раз, то необходимо либо ограничить срок службы такого изделия, либо увеличить толщину его элементов по сравнению с расчетной.

Рассматривая старение изделий как наиболее общий процесс изменения рабочих свойств материала и паяных швов на стадиях хранения, транспортировки и эксплуатации, включая все виды коррозии, целесообразно считать выражения (111)—(116) как частные случаи основного уравнения старения. Обычно оно записывается в виде [11]

$$\ln P = \ln P_0 - k'' \tau e^{-\frac{Q}{E}}, \quad (117)$$

или, после логарифмирования и разрешения относительно τ , в форме

$$\ln \tau = \ln(\ln P_0 - \ln P) - \ln k'' + \frac{Q}{E}, \quad (118)$$

где P — мгновенная прочность; P_0 — начальная прочность; k'' — функция природы и концентрации реагирующих веществ, а также константы k' , зависящей от свойств

материала, и константы k_0 , характеризующей размер дефекта; τ — длительность старения; Q — энергия активации; E — энергия реакции.

Как это видно из анализа уравнения (117), при постоянстве внешней среды прочность изделий уменьшается со временем по экспоненциальному закону. Срок службы τ изделия до достижения заданной прочности обратно пропорционален концентрации агрессивной среды. Как видно из формулы (118), логарифм долговечности изделия, отвечающей определенному значению прочности, прямо пропорционален энергии активации и обратно пропорционален энергии реакции.

Условие долговечности. Свойство изделия сохранять работоспособность (с возможными перерывами для технического обслуживания и ремонта) до разрушения или другого предельного состояния получило название долговечности [27, 30]. Предельное состояние может устанавливаться по изменениям параметров, по условиям безопасности, по экономическим показателям, по необходимости первого капитального ремонта и т. п. Основными количественными показателями долговечности изделий являются технический (назначенный) ресурс τ_0 и сроки службы до разрушения τ_p или до другого предельного состояния $\tau_{пр}$.

Долговечность паяных соединений достигается, если соблюдаются следующие соотношения:

$$\tau_0^* \geq \tau_0; \quad \tau_p^* \geq \tau_p; \quad \tau_{пр}^* \geq \tau_{пр}, \quad (119)$$

где τ_0^* , τ_p^* и $\tau_{пр}^*$ — соответствующие характеристики долговечности, относящиеся к паяным соединениям.

Величины τ_0 , τ_p и $\tau_{пр}$ определяются прежде всего технико-экономическими требованиями, сформулированными в задании на создаваемый объект. Однако их значения неоднократно уточняют при испытаниях в ходе отработки опытного образца. При этом руководствуются расчетными значениями указанных факторов долговечности, соблюдая связь с условиями выносливости, пластичности, коррозионной стойкости и старения.

Оценивая характеристики долговечности современных изделий по усталостным явлениям в материале конструкции и паяных соединениях, необходимо обеспечивать следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} N_0 &\leq N_{пр} [\sigma_a(T_4) > \sigma_w(T_4)]; \\ N_0^* &\leq N_{пр}^* [\sigma_a^*(T_4) > \sigma_w^*(T_4)], \end{aligned} \right\} \quad (120)$$

где N_0 и N_0^* — числа циклов нагружения материала конструкции и паяного соединения изделия за период выработки ресурса; $N_{пр}$ и $N_{пр}^*$ — предельно допустимые числа циклов нагружения материала конструкции и паяного соединения при амплитудах напряжений, превышающих соответствующие пределы выносливости (σ_{-1} и σ_{-1}^*), причем в общем случае $N_{пр} \neq N_{пр}^*$ и $N_0 \neq N_0^*$.

Для установления связи между $N_{пр}$, σ_{-1} , $\sigma_a(T_4)$ и соответственно $N_{пр}^*$, σ_{-1}^* и $\sigma_a^*(T_4)$ при умеренных температурах используют зависимость [33]

$$N_{пр} = \frac{Q}{\sigma_a} \ln \left[1 + \frac{1}{\exp \left(\frac{\sigma_a - \sigma_{-1}}{\sigma_{-1} - \sigma_{-1T}} \right) - 1} \right], \quad (121)$$

где Q — коэффициент сопротивления металла пластической деформации, кгс·цикл/мм²; σ_{-1T} — циклический предел текучести материала конструкции (паяного соединения), кгс/мм².

Значения Q , σ_{-1} и σ_{-1T} для некоторых листовых материалов приведены в табл. 4.

Расчеты по формуле (121) с использованием данных табл. 4 показывают, что, например, для стали 12Х18Н9Т при $\sigma_a = 30$ кгс/мм² $N_{пр} = 1,375 \cdot 10^4$ циклов. Если в этом случае частота колебаний, определяющая выносливость материала, составляет 50 Гц, то изделие работает до разрушения в течение $\tau_0 = \tau_p = 4,6$ мин.

4. Характеристики выносливости некоторых листовых материалов

Сплав	Q , кг · цикл/мм ²	σ_{-1} , кгс/мм ²	N циклов	σ_{-1T} , кгс/мм ²	Термическая обработка
12Х18Н9Т	$6,13 \cdot 10^5$	25	$10^6 - 10^7$	18,0	Аустенитизация
30ХГСА	$2,67 \cdot 10^7$	46	10^7	36,3	Закалка + отпуск при 520 °С
АМг6	$4,08 \cdot 10^7$	8	10^8	4,05	Отжиг при 315 °С

При оценке фактора долговечности, исходя из условия пластичности, следует пользоваться выражением (110), решая его относительно τ , откуда

$$\tau_0 = \tau = \frac{\delta}{\sigma_0 \sigma^n}. \quad (122)$$

Наконец, величины τ_0 , τ_p , $\tau_{пр}$ и соответственно τ_0^* , τ_p^* и $\tau_{пр}^*$ должны быть сопоставлены с фактором времени, учитываемым в формулах (111)—(114), (116)—(118). В последнем случае после потенцирования

$$\tau_{пр} = \tau = \frac{1}{k''} \ln \frac{P_0}{P} e^{\frac{Q}{E}}. \quad (123)$$

Отказ изделия произойдет тогда, когда мгновенная прочность снизится до значения приложенной нагрузки. В этом случае надежность равна нулю.

Условие надежности. Проблема надежности технических устройств является одной из центральных в современной науке и технике, однако теории надежности паяных соединений посвящено сравнительно немного работ [11, 16, 26, 27, 30, 32, 37, 40].

В качестве одного из основных количественных показателей надежности паяных соединений можно принять интенсивность отказов λ^* [26]. Эта величина показывает, какая доля от работающих в момент времени τ_1 паяных соединений выходит из строя в единицу времени. Тогда условие надежности можно записать в виде

$$\lambda^* \leq \lambda_y^* \leq \lambda_y, \quad (124)$$

где λ_y^* — интенсивность отказов паяных узлов (агрегатов) изделия; λ_y — интенсивность отказов прочих узлов изделия.

Если для образцов принять $\lambda_y = 5 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ (при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$), то выражение (124) получит вид [16, 26, 32, 37]

$$\lambda^* \leq 5 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1} \quad \text{и} \quad \lambda_y^* \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}. \quad (125)$$

Наиболее достоверным методом определения λ^* является испытание паяных соединений на работоспособность в условиях эксплуатации в течение заданного времени τ_0^* , τ_p^* или $\tau_{пр}^*$. Однако практически это трудно осуществимо, и поэтому прибегают к ускоренным испытаниям на форсированных режимах [46]. Интенсивность отказов по результатам испытаний вычисляют по формуле

$$\lambda^* = \frac{n}{\Delta \tau N_{ср}}, \quad (126)$$

где n — число отказавших паяных узлов; $\Delta \tau$ — интервал времени, для которого вычисляют λ^* ; $N_{ср}$ — среднее число исправных паяных узлов за время $\Delta \tau$.

Из выражения (126) следует, что необходимо обеспечить такие значения $\Delta \tau$ и $N_{ср}$, чтобы получить $n \geq 1$.

Значение λ^* можно вычислить также на основе обработки статистических данных об отказах паяных узлов. В частности, в работах [32, 37] приведены (по данным США на 1961 г.) следующие значения интенсивности отказов паяных соединений λ^* : наибольшее $5 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$, среднее $4 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$ и наименьшее $2 \cdot 10^{-10} \text{ ч}^{-1}$. Как видно из этих данных, технологический процесс пайки позволяет получить значения λ^* , удовлетворяющие условию (125).

Если согласно выражению (125) или (126) принять $\lambda^* = \text{const}$, то прочие характеристики надежности можно определить по формулам

$$f(\tau) = \lambda^* \exp(-\lambda^* \tau), \quad (127)$$

где $f(\tau)$ — частота отказов или плотность распределения времени безотказной работы; τ — время, в частности, τ_0^* или τ_p^* ;

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda^*}, \quad (128)$$

где $\tau_{\text{ср}}$ — средний срок службы (математическое ожидание), ч;

$$P(\tau) = \exp(-\lambda^* \tau), \quad (129)$$

где $P(\tau)$ — вероятность безотказной работы.

В последнем случае, приняв для некоторого цельнопаяного узла, состоящего из большого числа паяных соединений, $\tau_0^* = 2 \text{ ч}$ и $P(\tau_0^*) = 0,999$, можно вычислить по формуле (129) допустимое значение λ_y^* : $2\lambda_y^* = -\ln 0,999 = 10^{-3}$, откуда $\lambda_y^* = 5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, что не противоречит выражению (125).

Если принять предельный срок службы паяных соединений в изделии $\tau_{\text{пр}}^* = 5 \text{ лет} = 8,76 \cdot 10^3 \text{ ч}$ и $P(\tau_{\text{пр}}^*) = 0,999$, то $\lambda^* = 1,14 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, что также согласуется с условием (125).

Таким образом, выражения (125)—(129) могут быть использованы для совместного решения с выражениями (119) и (121)—(123).

В общем случае λ^* и λ_y^* зависят от времени и характеристики надежности имеют иной вид.

ЛОГИЧЕСКАЯ И ОПЕРАТОРНАЯ СХЕМЫ АЛГОРИТМА

Для моделирования на цифровых вычислительных машинах любого процесса, заданного с помощью математической модели, необходимо построить соответствующий моделирующий алгоритм, который обеспечит бы воспроизведение модели на машине.

Построение алгоритма является заключительным этапом анализа и исследования проектируемого процесса, когда решены все принципиальные вопросы создания математического аппарата для этой цели и требуется их упорядочить. Учитывая это обстоятельство, а также необходимость сохранить некоторую свободу в выборе типа вычислительной машины, предназначенной для реализации моделирующего алгоритма, обычно стараются сделать запись алгоритма независимой от характеристик машины.

Моделирующие алгоритмы, как и алгоритмы решения других сложных задач, представляют в виде логической и операторной схем, в которых указана последовательность операторов, каждый из которых изображает достаточно крупную группу элементарных операций.

Такая запись алгоритма хотя и не содержит развернутых схем счета отдельных промежуточных величин, тем не менее позволяет свободно ориентироваться в общей идее построения моделирующего алгоритма и достаточно полно отражает его логическую структуру. И логическая, и операторная формы представления алгоритма не учитывают особенностей системы команд той или иной вычислительной машины. Учесть эти особенности, а также построить развернутые схемы счета для воспроизведения отдельных операторов алгоритма можно при программировании задачи.

Следует заметить, что моделирующий алгоритм для любого процесса можно рассматривать как форму записи математической модели или ее элементов. При этом алгоритм должен обладать следующими свойствами:

точно указывать порядок выполнения операций и быть пригодным для решения задач определенного класса;

обеспечивать получение результата через конечное (пусть даже очень большое) число шагов;

допускать правильное решение задачи даже лицами, не представляющими сущности задачи.

Каждый алгоритм определяет цель решения задачи, необходимую исходную информацию, систему правил ее переработки и последовательность применения этих правил.

Среди операторов моделирующего алгоритма будем различать вычислительные операторы, обозначаемые буквой A_i , операторы формирования неслучайных величин F_i , логические операторы P_i , операторы счета или записи K_i и оператор выдачи результатов J , означающий окончание вычислений.

Рассмотрим пример алгоритма, предназначенного для исследования одного из элементов общей математической модели процесса пайки — температурного условия.

Полагая, что материал конструкции и его эксплуатационная температура заданы, введем следующие операторы:

- F_1 — формирование $t_1 = \text{const}$ в соответствии с данными стр. 349;
- A_2 — вычисление $T_1(t_1)$ по формулам (стр. 350);
- F_3 — формирование $t_4 = \text{const}$ по техническому заданию;
- A_4 — вычисление $T_4(t_4)$ по формулам (стр. 351);
- A_5 — вычисление $K_4(T_1; T_4)$ по формуле (53);
- F_6 — формирование $0 \leq \alpha_p \leq 0,8$ согласно данным стр. 351;
- A_7 — вычисление $K_1(t_1; \alpha_p)$ по формуле (16);
- A_8 — вычисление $t_2(t_1; K_1)$ по формуле (4);
- F_9 — формирование $0,6 \leq K_2 \leq 0,8$ согласно данным стр. 350;
- A_{10} — вычисление $K_3(K_2; K_4)$ по формуле (52);
- A_{11} — вычисление $t_3(T_1; K_3)$ по формуле (44);
- P_{12} — проверка логического условия $t_3 \geq t_4 + \frac{1-K_2}{K_2}(t_4 + 273)$;
- K_{13} — запись (запоминание) условия из P_{12} ;
- P_{14} — проверка логического условия $t_3^* \geq t_4 + \frac{1-K_2^*}{K_2^*}(t_4 + 273)$;
- F_{15} — формирование $15 \leq \Delta t_2 \leq 75^\circ\text{C}$ согласно данным стр. 350;
- F_{16} — формирование $0 \leq \Delta t_3 \leq 50^\circ\text{C}$ по формуле (49);
- P_{17} — проверка логического условия $t_3 \leq K_1 t_1 - \Delta t_2 - \Delta t_3 = D$;
- K_{18} — запись (запоминание) условия $t_3 \leq D$;
- P_{19} — проверка логического условия $t_3 \leq K_1 t_1 - \Delta t_2^* - \Delta t_3 = D^*$;
- A_{20} — вычисление $\Delta t_5(\Delta t_2; \Delta t_3)$ по формуле (21);
- F_{21} — формирование $t_6 \leq t_3$ согласно формуле (20);
- A_{22} — вычисление $t_5(\Delta t_5; t_6)$ по формуле (19);
- F_{23} — формирование $T_c > T_2 = t_2 + 273$ согласно данным стр. 353;
- F_{24} — формирование $F_{\min} \leq F \leq F_{\max}$ согласно данным стр. 353;
- F_{25} — формирование $\alpha = \text{const}$ согласно данным стр. 353;
- A_{26} — вычисление $\alpha_{\text{ср}}(\alpha; F)$ по формуле (23);
- F_{27} — формирование $q_{\text{л}} = \text{const}$ согласно данным стр. 353;
- A_{28} — вычисление $\tilde{T}(T_c; F; \alpha; \alpha_{\text{ср}}; q_{\text{л}})$ согласно формулам (стр. 353);
- F_{29} — формирование $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$ согласно данным стр. 353;
- F_{30} — формирование $c = \text{const}$ согласно данным стр. 353;
- F_{31} — формирование $\rho = \text{const}$ согласно данным стр. 353;
- A_{32} — вычисление $C_{\text{и}}(V, c, \rho)$ по формуле (22);
- F_{33} — формирование $\varepsilon = \text{const}$ согласно данным стр. 353;
- F_{34} — формирование $\sigma_0 = \text{const}$ согласно данным стр. 353;
- F_{35} — формирование $T_{\text{нач}} = \text{const}$ согласно данным стр. 353;

A_{36} — вычисление $\vartheta_{\text{нач}}(\tilde{T}; T_{\text{нач}})$ по формулам (стр. 353);

A_{37} — вычисление $\vartheta(\tilde{T})$ по формулам (стр. 353);

A_{38} — вычисление $\vartheta_2(t_2; \tilde{T})$ по формулам (стр. 353);

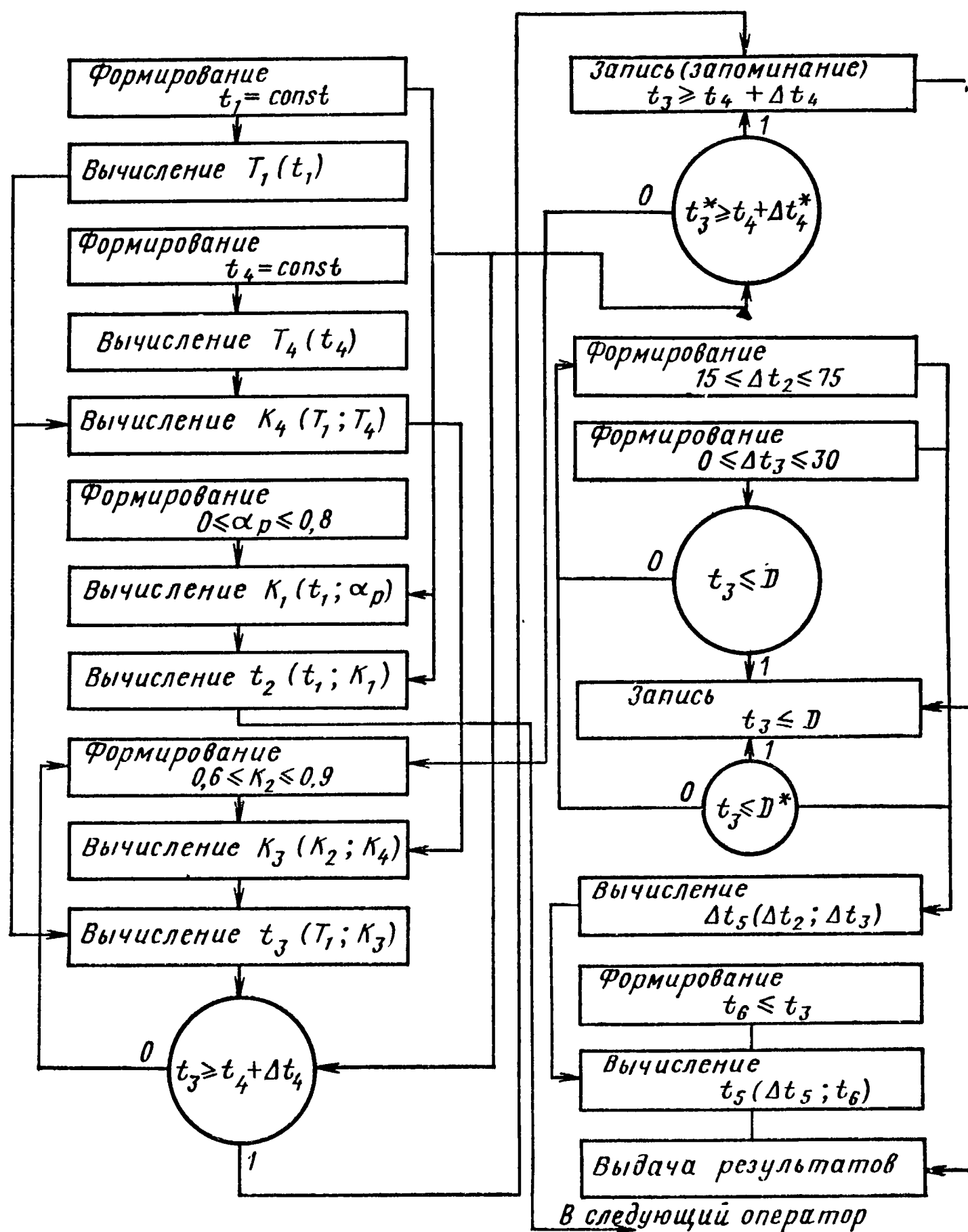


Рис. 15. Часть логической блок-схемы алгоритма температурного условия процесса пайки

A_{39} — вычисление $N(\alpha; \tilde{T}; \epsilon; \sigma_0)$ по формулам (стр. 353);

A_{40} — вычисление $\tau^*(\vartheta_{\text{нач}}; \vartheta; \vartheta_2; N)$ по формуле (25);

A_{41} — вычисление $\tau(\tau^*; F; \alpha; C_{\text{и}})$ по формулам (стр. 353);

$Я_{12}$ — выдача результатов (окончание вычислений).

Тогда операторная схема рассматриваемого алгоритма будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} &F_1^2 \uparrow A_2^5 F_3^{12} A_4^5 \cdot 2,4 A_5^{10} F_6^{1,6} A_7^{8,1,7} A_8^{2,3,12,14} F_9^{14,5,9} A_{10}^{11} \\ &2,10 A_{11}^{12,3,9,11} P_{12,9}^{13,12} K_{13}^{42,3,9,11} P_{14,9}^{13,17,19} F_{15}^{19} F_{16}^{17} \\ &8,11,15,16 P_{17,15}^{18,8,11,15,16} K_{18}^{42,8,11,15,16} P_{19,15}^{18,15,16} A_{20}^{22}; \\ &11 F_{21}^{22,20,21} A_{22}^{42,8} F_{23}^{28} F_{24}^{26} F_{25}^{26,24,25} A_{26}^{28} F_{27}^{28,23,26,27} A_{28}^{36} \\ &F_{29}^{32} F_{30}^{32} F_{31}^{32,29,30,31} A_{32}^{41} F_{33}^{39} F_{34}^{39} F_{35}^{36,28,35} A_{36}^{40} \\ &28 A_{37}^{40,8,28} A_{38}^{40,25,28,33,34} A_{39}^{40,36,37,38,39} A_{40}^{41} \\ &24,25,32,40 A_{41}^{42,13,18,22,41} Я_{42}. \end{aligned} \right\} \quad (130)$$

На рис. 15 дана часть логической блок-схемы этого алгоритма, позволяющая получить наглядное представление о его работе.

Аналогичным образом строят алгоритмы и вычисляют остальные элементы общей математической модели процесса пайки, используя в качестве исходной информации результаты расчета температурного условия и другие входные данные.

В результате исследования совокупности элементов общей математической модели процесса пайки накапливается информация, которая немедленно может быть использована конструкторской и технологической службами при создании новых типов изделий и, в частности, для проектирования технологического процесса их изготовления.

ЭТАПЫ ПТП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В ходе ПТП требуется выработать определенную последовательность действий или рациональную схему проектирования, состоящую из отдельных этапов.

Получив техническое задание (ТЗ), технологическая служба (ТС) совместно с конструкторами выбирает конструкционный материал для разрабатываемого изделия. С этого момента эффективным мероприятием является включение в общий механизм технологического проектирования математической модели технологического процесса (ММТП) пайки, хотя оно не исключается и на более ранних стадиях.

После расчета температурного условия по схеме (130) можно приступить ко второму этапу ПТП: по полученным расчетным и справочным данным выбрать марку припоя [6, 17, 18, 20—22, 25, 35, 36, 42]. При отсутствии в справочниках необходимого припоя можно разработать новый припой или выбрать другой конструкционный материал. С этого этапа ПТП сопровождается экспериментальными лабораторными исследованиями.

При наличии подходящего припоя производят уточняющий расчет температурного условия, поскольку известны окончательные значения $t_3 = \text{const}$ и $\Delta t_3 = \text{const}$, а также расчет всех остальных условий ММТП. По мере поступления информации из блока ММТП выбирают метод пайки. Это третий этап ПТП (22, 42). Затем переходят к следующему этапу ПТП, так как необходимо уточнить predetermined расчетами способ и скорость нагрева, термический цикл пайки; выбрать способ нанесения (подачи) припоя и среду для изделия (вакуум, активная газовая среда, флюс); оценить реализацию условия взаимодействия окисной пленки и металла с паяльной средой, условия смачиваемости и растекаемости, конструктивной приемлемости изделия, теплового баланса, а также металлургического взаимодействия припоя с паяемым материалом. На этом этапе можно построить график термического цикла пайки, т. е. $t^{\circ}\text{C} = f(\tau)$, и выдать исходные данные для проектирования технологической оснастки.

В случае затруднений при реализации условия смачиваемости и растекаемости, а также условия металлургического взаимодействия могут быть использованы металлопокрытия. С этой целью используют, например, медь, никель и серебро для алюминиевых сплавов и хром, ниобий и молибден для титановых сплавов. С учетом выбранного металлопокрытия оценивают выполнимость условия коррозионной стой-

кости и старения, а также условий пластичности, выносливости, прочности, долговечности и надежности изделия.

При соблюдении перечисленных условий появляется возможность для оценки технологичности изделий. Если критерии технологичности оказываются удовлетворенными, то полученная при ПТП информация поступает в блок технико-экономического обоснования проекта (ТЭОП) и далее в блок экспериментальных исследований для проведения ОКР и ОТР.

Если при данных обстоятельствах условие технологичности не может быть выполнено, то весь цикл работ по ПТП должен быть повторен на базе какого-то другого метода изготовления изделия, например, с помощью сварки, электроискровой обработки, литья и т. п.

Очевидно, что для эффективного решения этой задачи необходимо разработать математические модели других известных методов изготовления изделий. Только в этом случае можно всесторонне и быстро сравнить различные варианты технологического процесса, а следовательно, и наиболее вероятно, что выбранный вариант будет оптимальным.

КОДИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Информацию, содержащуюся в общепринятых технологических документах, невозможно оперативно передать на дальние расстояния или ввести в управляющую и вычислительную технику. Необходимые сведения о технологическом процессе пайки должны быть представлены в виде системы условных обозначений.

Ниже кратко изложена одна из систем условных обозначений для характеристики процесса пайки и применяемых паяльных материалов. В основу системы положены рекомендации Международного Института Сварки (МИС), опубликованные в специальных документах МИС-63-60, МИС-64-60 и МИС-65-60 [28].

Рассматриваемая система обозначений подразделяется на три группы.

Первая группа состоит из двух обозначений. Первое выражает соотношение абсолютных температур начала плавления припоя T_3 и паяемого материала T_1 , причем для низкотемпературных припоев, согласно выражению (45), принят символ Н, а для высокотемпературных в соответствии с выражением (46) — символ В. Второе обозначение определяет тип припоя в зависимости от его химической природы, т. е. характера основы и легирующих элементов. Для выражения типа припоев приняты заглавные буквы латинского алфавита от А до Z (табл. 5).

5. Кодовые обозначения типа припоев

Символ	Припой	Символ	Припой
А	Медь техническая, $Cu \geq 99\%$	К	Сплавы, содержащие магний
В	Медно-цинковые сплавы с малыми добавками других элементов или без них	Л	Сплавы, содержащие никель
С	Медно-фосфористые сплавы с серебром или без него, а также с малыми добавками других элементов или без них	М	Сплавы, содержащие палладий
Д	Прочие медные сплавы	Н	Сплавы, содержащие золото и (или) платину
Е	Серебро, $Ag \geq 99\%$	Р	Сплавы титана, циркония, ванадия, ниобия, молибдена, тантала и вольфрама
Ф	Серебряно-медно-цинковые сплавы с кадмием или без него, а также с малыми добавками других элементов или без них	Q	Сплавы бериллия
Г	Серебряно-медные сплавы с малыми добавками других элементов или без них	R	Олово, $Sn \geq 99\%$
Н	Серебряно-марганцевые сплавы с малыми добавками других элементов или без них	S	Оловянно-свинцовые сплавы с малыми добавками других элементов или без них
Ж	Алюминий с другими элементами или без них	Т	Цинково-кадмиевые сплавы с малыми добавками других элементов или без них
		U	Цинково-оловянные сплавы с малыми добавками других элементов или без них
		V	Сплавы, содержащие индий
		W	Сплавы, содержащие галлий
		Z	Прочие металлы и сплавы

Вторая группа содержит два обозначения. Первое определяет вид припоя (табл. 6), второе — вид флюса (табл. 7) в зависимости от способа их поставки или применения для пайки.

В третью группу входят четыре обозначения. Первый символ в виде условной цифры обозначает температуру начала плавления (ликвидус) припоя (табл. 8), а второй, и третий символы в виде букв — химическую природу паяемых материалов (табл. 9). При соединении деталей из однородных материалов ставятся две одинаковые буквы.

Четвертый символ третьей группы, указываемый строчной латинской буквой, обозначает условную прочность паяных соединений встык, телескопических или внахлестку (табл.10).

6. Кодовые обозначения видов припоев

Сим-вол	Припой
A	Пруток
B	Проволока
C	Порошок или гранулы
D	Гальваническое покрытие
E	Химическое покрытие
F	Металлизационное покрытие
G	Покрытие, нанесенное в вакууме
H	Покрытие, нанесенное путем прокатки
I	Ионное покрытие в тлеющем разряде
Z	Прочие

7. Кодовые обозначения видов флюсов

Сим-вол	Флюс
A	На присадочном материале
B	В гранулах или мелкораздробленный
C	Внутри присадки
D	Порошок или паста
E	Газообразный
F	Защитная атмосфера
G	Вакуум
X	Без флюса
Z	Прочие

8. Обозначение припоев по температуре начала плавления

Символ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура начала плавления припоя, °С	< 500	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1400

9. Кодирование основного (паяемого) материала

Сим-вол	Паяемый материал	Сим-вол	Паяемый материал
A	Малоуглеродистая сталь, армко-железо	M	Ванадий и его сплавы
B	Высокоуглеродистая сталь, чугун	N	Ниобий и его сплавы
C	Конструкционная сталь	P	Молибден и его сплавы
D	Нержавеющая сталь	Q	Тантал и его сплавы
E	Медь и ее сплавы	R	Вольфрам и его сплавы
F	Никель и его сплавы	S	Керамикометаллы
G	Алюминий и его сплавы	T	Керамика
H	Магний и его сплавы	U	Полупроводники
I	Титан и его сплавы	V	Графит
K	Бериллий и его сплавы	W	Композиционные материалы
L	Хром и его сплавы	Z	Прочие материалы

Характеристики этой группы определяются в соответствии с методами испытания, описанными в документе МИС-63-60 [28].

Если в обозначении характеристик процесса пайки и паяемых материалов пропускается символ, то вместо него ставится тире.

10. Кодирование показателей прочности паяных соединений

Сим-вол	Прочность соединения (равна или более), кгс/мм ²	Сим-вол	Прочность соединения (равна или более), кгс/мм ²	Сим-вол	Прочность соединения (равна или более), кгс/мм ²	Сим-вол	Прочность соединения (равна или более), кгс/мм ²
a	< 2,5	h	17,5	o	35	v	60
b	2,5	i	20	p	37,5	w	65
c	5,0	j	22,5	q	40	x	70
d	7,5	k	25	r	42,5	y	80
e	10	l	27,5	s	45	z	90
f	12,5	m	30	t	50		
g	15	n	32,5	u	55		

В качестве примеров можно привести два случая кодирования технологической информации.

1. В действующую технологическую документацию на объекте в пункте *x* требуется срочно ввести в качестве дополнения следующий раздел из новой инструкции, разработанной в пункте *y*: «... детали из алюминиевого сплава АЛ5 с температурой начала плавления $T_1 = 850$ К необходимо паять припоем 36А системы алюминий — медь — цинк — кремний в виде прутка с использованием порошкообразного флюса (температура начала плавления $T_3 = 763$ К). Требуемая прочность на срез телескопического соединения не менее 13 кгс/мм².

Учитывая, что $K_3 = 763 : 850 = 0,898$, т. е. $0,4 \leq K_3 \leq 1$, кодированное обозначение этой информации будет BJAD0GGf.

2. Для ввода в вычислительную машину технологической информации с целью получения ответов «да» или «нет» подготовлен вопрос: «Можно ли паять в вакууме детали электровакуумного прибора из тантала ($T_1 = 3272$ К) и вольфрама ($T_1 = 3683$ К) без нарушения их нагартованного состояния с помощью припоя ($T_3 = 1143$ К) системы золото — медь — никель (81,5—15,5—3%) в виде гальванического многослойного покрытия на одной из деталей и обеспечить прочность стыкового соединения не менее 18 кгс/мм²?»

Поскольку здесь $K_3 = 1143 : 3272 = 0,349$, т. е. $0 < K_3 < 0,4$, кодированная запись будет HNDG4QRh.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский С. Д., Сердюк С. В. Скоростная капиллярная пайка стальных изделий токами высокой частоты. М., Машгиз, 1949, 74 с.

2. Болховитинов В. Ф. Пути развития летательных аппаратов. М., Оборонгиз, 1962, с. 85—86.

3. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М., «Наука», 1968, с. 42.

4. Вольский А. Н., Сергиевская Е. М. Теория металлургических процессов. М., «Металлургия», 1968, 344 с.

5. Гесь С. Научная организация труда — одна из форм реализации закона экономии времени. — «Вопросы экономики», 1969, № 6, с. 125.

6. Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. В. Пайка деталей электровакуумных приборов. Под ред. А. И. Шокина. М., «Энергия», 1967, 288 с.

7. Горбунов Н. С. Физико-химические условия образования диффузионных покрытий и методы их нанесения. — В кн.: Исследования по жаропрочным сплавам. Т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1958, с. 186—197.

8. Гуляев А. П., Моргунова Н. Н., Клыпин Б. А. Механические свойства

тугоплавких металлов. — В кн.: Физико-химические исследования жаропрочных сплавов. М., «Наука», 1968, с. 32—39.

9. Долгов Ю. С. Некоторые вопросы пайки тугоплавких металлов. — В кн.: Технология и автоматизация процессов сварки и пайки. М., «Машиностроение», 1969, с. 74.

10. Долгов Ю. С., Сидохин Ю. Ф. Кинетика диффузионной пайки титана. — В кн.: Пайка материалов в машиностроении. Материалы III Всесоюзной конференции по пайке и склеиванию. Рига, ЛатИНТИ, 1968, с. 53—60.

11. Елизаветин М. А., Сатель Э. А. Технологические способы повышения долговечности машин. М., «Машиностроение», 1969, с. 165—166.

12. Есенберлин Р. Е. Термодинамические основы пайки в атмосфере бор-галогидных газов. — В кн.: Пайка в машиностроении. Материалы конференции. Сборник 1. М., МДНТП им Ф. Э. Дзержинского, 1967, с. 12—22.

13. Жук Н. П. Курс коррозии и защиты металлов. М., «Металлургия», 1968, 318 с.

14. Журавлев В. Н., Николаева О. И.

Машиностроительные стали, Справочник. Изд. 2-е. М., «Машиностроение», 1968, 331 с.

15. Зарубин В. С. Температурные поля в конструкции летательных аппаратов. Методы расчета. М., «Машиностроение», 1966, 215 с.

16. Инженерный справочник по космической технике. Под общей ред. А. В. Солодова. М., «Воениздат», 1969, с. 626—638.

17. Коль В. Технология материалов для электровакуумных приборов. Пер. с англ. под ред. Б. М. Царева. М. — Л., Госэнергоиздат, 1957, 448 с.

18. Конструкционные материалы. Энциклопедия современной техники. В трех т. М., «Советская энциклопедия», 1963—1965.

19. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М., Изд. иностр. лит., 1955, 546 с.

20. Лакедемонский А. В. и Хряпин В. Е. Справочник паяльщика. Изд. 3-е. М., «Машиностроение», 1967, 327 с.

21. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов М., «Машиностроение», 1967, 37 с.

22. Лоцманов С. Н., Петрунин И. Е. Пайка металлов. М., «Машиностроение», 1966, 252 с.

23. Лукомский Я. И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. М., Госстатиздат, 1961, 426 с.

24. Малый С. А. Экономичный нагрев металла. М., «Металлургия», 1967, 191 с.

25. Манко Г. Г. Пайка и припой. Материалы, конструкции, технология и методы расчета. Пер. с англ. М., «Машиностроение», 1968, 323 с.

26. Мартынов Г. К. Надежность электрических соединений, выполненных пайкой легкоплавкими припоями. М., Изд-во Комитета Стандартов, 1968, 52 с.

27. Методика технико-экономической оценки транспортных самолетов. М., ГосНИИГА, 1966.

28. Национальный комитет СССР по сварке. XIII Конгресс международного института сварки. Под ред. Г. А. Маслова. М., Машгиз, 1962, с. 299—306.

29. Никитин В. И. Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на твердые. М., Атомиздат, 1967, 288 с.

30. Основные вопросы надежности и долговечности машин. Под ред. А. С. Проникова, М., МАТИ, 1969, 210 с.

31. Петрунин И. Е. О характере границ основной металл — расплавленный припой. — В кн.: Пайка материалов в машиностроении. Материалы III Всесоюзной конференции по пайке и склеиванию. Ч. I. Рига, ЛатИНТИ, 1968, с. 3—13.

32. Половко А. М. Основы теории надежности. М., «Наука», 1964, 446 с.

33. Почтенный Е. К. К теории усталости металлов. — В кн.: Прочность металлов при циклических нагрузках. Материалы IV совещания по усталости металлов. М., «Наука», 1967.

34. Прокошкин Д. А., Васильева Е. В. Гомологический закон диффузии и жаропрочное легирование металлов. — В кн.: Физико-химические исследования жаропрочных сплавов. М., «Наука», 1968, с. 96—106.

35. Руководство по пайке металлов. Подготовлено Комитетом пайки американского общества сварщиков. Пер. с англ. под ред. С. Н. Лоцманова. М., Оборонгиз, 1960, 192 с.

36. Руководство по пайке металлов мягкими припоями. Подготовлено Комитетом пайки американского общества сварщиков. Пер. с англ. под ред. В. Р. Верченко. М., Оборонгиз, 1963, 186 с.

37. Сапожников Р. А., Бессонов А. А., Шоломицкий А. Г. Надежность автоматических управляющих систем. М., «Высшая школа», 1964, 264 с.

38. Сидохин А. Ф., Сидохин Ю. Ф., Долгов Ю. С. Вопросы теории диффузионной пайки металлов. — В кн.: Пайка материалов в машиностроении. Материалы III Всесоюзной конференции по пайке и склеиванию. Ч. II. Рига, ЛатИНТИ, 1968, с. 51—52.

39. Сланский А., Воллман Я. Капиллярная пайка. Пер. с чешского под ред. З. В. Никифоровой. М., Машгиз, 1963, 199 с.

40. Справочник по надежности. В трех т. Пер. с англ. под ред. Б. Р. Левина. М., «Мир», 1969.

41. Станюкович А. В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов. М., «Металлургия», 1967, 199 с.

42. Технологичность конструкций. Справочное пособие. Под ред. С. Л. Ананьева и В. П. Купровича. М., «Машиностроение», 1969, 423 с.

43. Форрест П. Усталость металлов. Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. М., «Машиностроение», 1968, 370 с.

44. Фролов В. П. Математическое моделирование процессов пайки. — В кн.: Пайка в машиностроении. Материалы конференции. Сборник I. М., МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1967, с. 43—58.

45. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости. Пер. с англ. под ред. И. Ф. Образцова. М., «Машиностроение», 1969, 674 с.

46. Чернов О. В., Подвигина О. П., Волкова А. В. Метод сравнительной оценки надежности вакуумно-плотных паяных соединений. — В кн.: Пайка в промышленности. Материалы семинара. Сборник 2. М., МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1970, с. 47—50.

47. Щедров К. П., Гакман Э. Л. Жаростойкие материалы. Справочное пособие. М. — Л. «Машиностроение», 1965, 166 с.

48. Щербак Г. К. Приближенная количественная зависимость механических свойств конструкционной стали. — «Металловедение и термическая обработка металлов» 1965, № 11, с. 19—21.

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ САНИТАРИЯ, ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ТЕХНИКА

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Охрана труда включает в себя законодательство о труде, санитарно-гигиенические требования к производственной среде и мероприятия по технике безопасности и противопожарной технике.

Мероприятия по технике безопасности способствуют выявлению опасных моментов, которые могут возникнуть в процессе выполнения той или иной работы; изысканию и внедрению эффективных средств, исключающих возникновение несчастных случаев.

Создание благоприятных условий для высокопроизводительного и безопасного труда на производстве осуществляется в нашей стране на основе конституции и законоположений, включенных в законодательство Союза ССР и союзных республик о труде.

Обеспечение благоприятных и безопасных условий труда возлагается на администрацию предприятия, учреждения.

Администрация обязана внедрять современные средства техники безопасности, предупреждающие производственный травматизм, и обеспечить санитарно-гигиенические условия, предотвращающие возникновение профессиональных заболеваний рабочих и служащих. Производственные здания, сооружения, оборудование, технологические процессы должны отвечать требованиям, обеспечивающим здоровье и безопасные условия труда.

Ввод в эксплуатацию новых и реконструированных объектов не допускается без разрешения органов, осуществляющих Государственный санитарный и технический надзор, технический надзор технической инспекции профсоюза и профсоюзного комитета предприятия, вводящего объект в эксплуатацию.

Администрация предприятия обязана обеспечить надлежащее техническое оборудование рабочих мест и создать условия, соответствующие правилам техники безопасности и производственной санитарии.

Правила по технике безопасности, единые для всех отраслей народного хозяйства, утверждаются Советом Министров СССР, либо (по его поручению) другими государственными органами совместно или по согласованию с ВЦСПС [10].

ПОДГОТОВКА К ПАЙКЕ. РАБОЧЕЕ МЕСТО ПАЯЛЬЩИКА

При подготовке заготовок к пайке применяют механические способы зачистки и травление. При использовании механических способов рекомендуется применять вращающиеся барабаны, гидropескоструйные установки, дробеструйные камеры. Очистка сухим песком вызывает профессиональные заболевания, поэтому законодательством по охране труда она запрещена. Очистительные установки необходимо располагать в отдельных помещениях, которые должны быть оборудованы мощной вытяжной вентиляцией с очистным устройством. Если камера установлена в помещении цеха, то необходимо обеспечить соответствующее уплотнение ее двери и люков, исключающее попадание пыли в общее помещение. При применении травления заготовок травильное отделение необходимо также располагать в отдельном помещении. Работать с кислотами и щелочами необходимо в резиновых перчатках и кислотостойкой одежде. Лицо необходимо защищать от брызг защитными очками или экраном из целлулоида или органического стекла.

При попадании брызг кислоты или щелочи на кожу пораженное место необходимо немедленно промыть водой. Температура растворов в ваннах не должна быть

выше установленной технологическим процессом, так как при повышении температуры усиливается испарение и воздух в помещении цеха сильно загрязняется. Для снижения концентрации паров кислот и щелочей в воздухе кроме вытяжного зонта над каждой травильной ванной необходимо устраивать бортовые отсосы.

При применении растворителей для очистки заготовок также необходимо соблюдать правила техники безопасности. Четыреххлористый углерод при применении его для очистки и обезжиривания деталей испаряется с выделением вредных газов, поэтому пользоваться им не следует. Детали, обезжиренные углеводородами, следует перед пайкой полностью просушить, так как продукты их разложения могут быть токсичными. Некоторые растворители, как бензол и газолин, огнеопасны и ядовиты, поэтому применения их необходимо избегать. Пары трихлорэтилена и тетрахлорэтилена при нагреве диссоциируют с образованием ядовитых свободных галогенов и фосгена. Кроме того, пары этих растворителей тяжелее воздуха и могут распространяться на значительные расстояния от места очистки. При выборе химических очистителей необходимо прежде всего определить содержание в их составе огнеопасных веществ и возможность выделения при нагреве ядовитых паров и газов, и только после этого решать вопрос о возможности их применения и предусматривать мероприятия по технике безопасности.

При сборке под пайку инструмент необходимо применять только по назначению. При пайке с флюсами при нанесении их на соединяемые места нужно пользоваться кистью или фарфоровой лопаточкой. Необходимо избегать попадания флюса на кожу рук. Порошкообразные флюсы в целях уменьшения распыливания необходимо смешивать с соответствующими растворителями и применять в виде паст.

При пайке оловянно-свинцовыми припоями контакт с ними, а также с паяными деталями приводит к загрязнению свинцом кожи рук и одежды работающих. Концентрация свинца в воздухе на рабочих местах паяльщика может достигать $0,1 \text{ мг/м}^3$. Поэтому в цехах с большим объемом пайки необходимо проведение профилактических мероприятий. Для участков пайки и монтажа, сопровождающегося пайкой, следует отводить отдельные помещения. Рабочие поверхности оборудования необходимо покрывать легкообмываемыми материалами, стационарные места пайки необходимо оборудовать местными вытяжными устройствами, обеспечивающими скорость воздуха непосредственно на месте пайки не менее $0,6 \text{ м/с}$. Помещения, в которых производится пайка, должны обеспечиваться приточным воздухом, подаваемым в верхнюю зону.

В процессе пайки припоями на основе других металлов вредные пары и газы могут образовываться или за счет сгорания загрязнений, имеющих на поверхности паяемых деталей, или при нагреве флюсов и припоев. Все эти испарения загрязняют атмосферу, поэтому необходимо постоянно следить за этим и применять меры для их удаления. Наиболее вредны испарения галогидных флюсов, особенно содержащих фториды. Все склянки с флюсами, содержащими соединения фтора, должны иметь наклейки с указанием мер предосторожности при их применении.

Нельзя допускать образования ядовитых паров или пыли кадмия, свинца и цинка, что усиливается, когда эти металлы применяют в чистом виде, например, в качестве покрытий. В многокомпонентных припоях вредное действие этих металлов снижается. При пайке нельзя допускать перегрева припоев, усиливающего испарение его отдельных компонентов.

При пайке с применением газовых сред следует иметь в виду, что некоторые из них дают с воздухом взрывоопасные смеси. Поэтому перед нагревом контейнера, реторты или печи с такой атмосферой необходимо продуть их чистым воздухом. Чтобы предупредить проникновение в пространство печи атмосферного воздуха и, следовательно, образование взрывоопасной смеси, в ней необходимо поддерживать небольшое избыточное давление с тем, чтобы скорость истечения газа была выше, чем скорость горения в факеле. Необходимо также предупреждать утечку контролируемых газовых сред через неплотности в трубопроводах и соединениях.

Места утечки можно выявить путем смачивания подозрительных мест мыльной водой. При пайке с газообразными флюсами необходимо следить за тем, чтобы они полностью удалялись вытяжной вентиляцией. Во избежание отравления газами установки для получения контролируемых атмосфер необходимо размещать в отдельном хорошо вентилируемом помещении.

Для предупреждения взрывов при выполнении паяльных работ запрещается производить пайку сосудов, находящихся под давлением, а также емкостей из-под легко воспламеняющихся материалов без предварительной обработки.

От правильной организации рабочего места зависят рост производительности труда, безопасность работы, качество выпускаемой продукции и степень утомляемости работающего [2].

Рабочее место монтажника-паяльщика радио- и электроаппара-

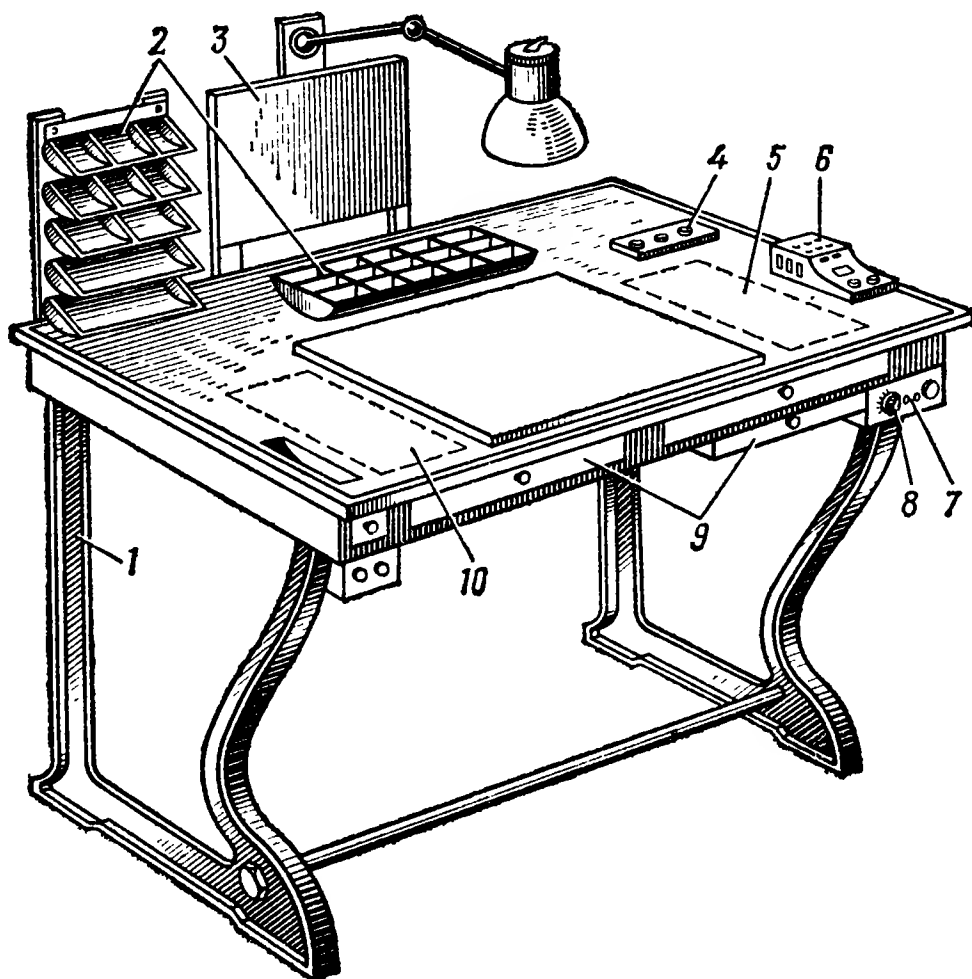


Рис. 1. Рабочее место монтажника-паяльщика:

1 — монтажный верстак; 2 — кассы для деталей; 3 — рамка для технологической карты; 4 — подставка для флюса и смывки; 5 — место расположения плоскогубцев, кусачек, пинцета и др.; 6 — подставка для паяльника; 7 — гнезда для включения паяльника; 8 — регулятор нагрева паяльника; 9 — ящики для инструмента; 10 — место расположения трубчатого припоя

туры, различных приборов — монтажный стол или верстак (рис. 1). Он оснащен необходимыми приспособлениями, инструментом и деталями. Инструмент должен быть разложен по ящикам в строгом порядке по группам и типоразмерам. Каждое приспособ-

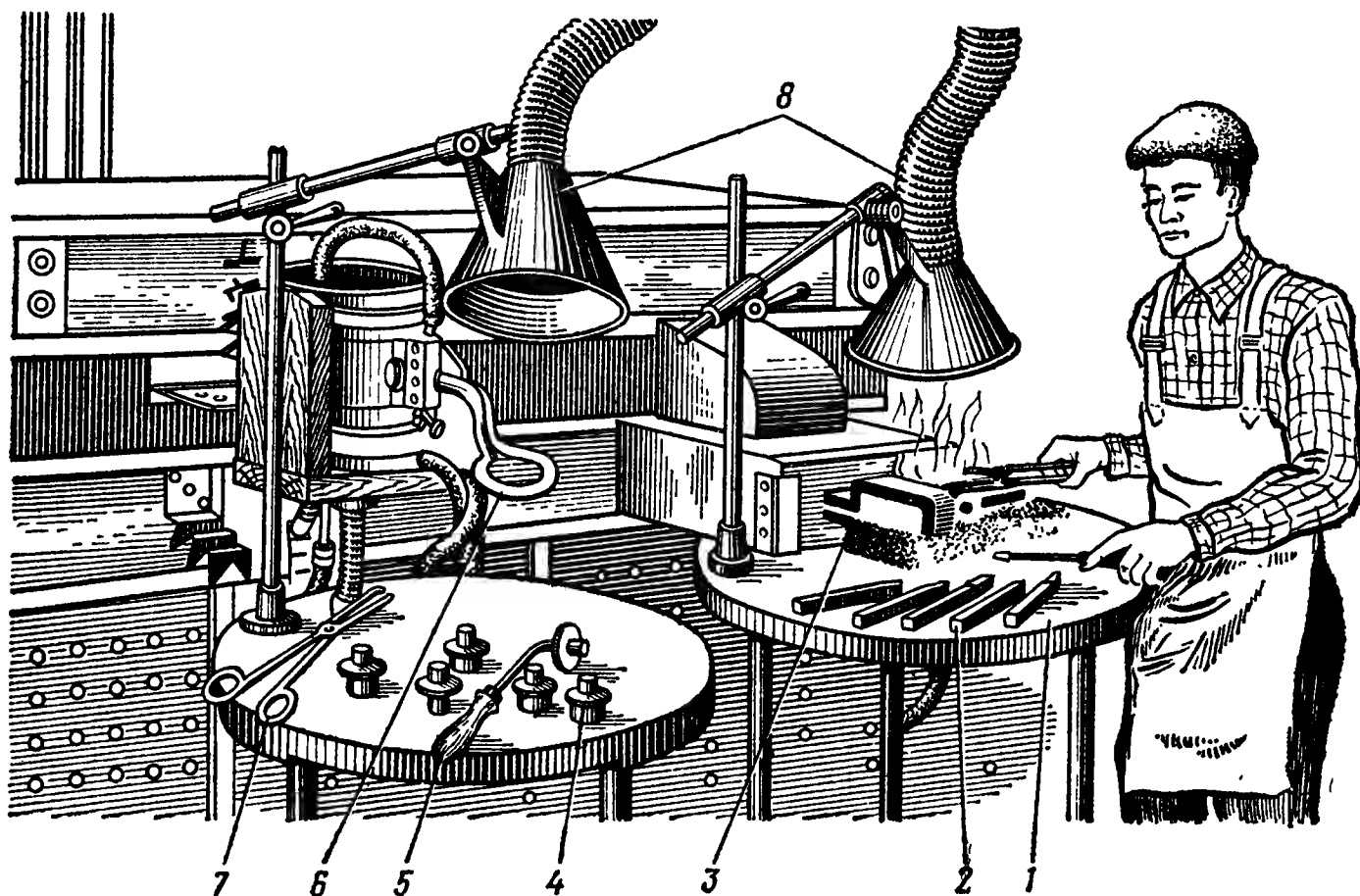


Рис. 2. Рабочее место паяльщика высокочастотной установки:

1 — место пайки; 2 — паяные резцы; 3 — индуктор; 4 — место пайки; 5 — приспособление; 6 — индуктор; 7 — клещи; 8 — вентиляция

собрание имеет свое определенное место. Стол монтажника должен быть обеспечен хорошим искусственным и естественным освещением, а также вытяжной вентиляцией.

Рабочее место паяльщика высокочастотной установки — часть производственной площади вблизи оборудования, на которой установлены стол и шкаф для хра-

нения инструментов, приспособлений, припоя и флюса. Рабочее место должно быть оборудовано надежной вентиляцией и хорошим освещением (рис. 2).

Рабочее место паяльщика для газопламенной пайки должно быть расположено в специально отведенном помещении. Площадь рабочего места каждого паяльщика должна быть не менее 4 м². На рабочем месте располагают железный стол, выложенный огнеупорным кирпичом, ящик для хранения прутков припоя и флюса, шкаф для инструментов и приспособлений и другое оборудование (рис. 3).

Рабочее место должно быть обеспечено хорошей вытяжной вентиляцией с местными отсосами и оборудовано освещением.

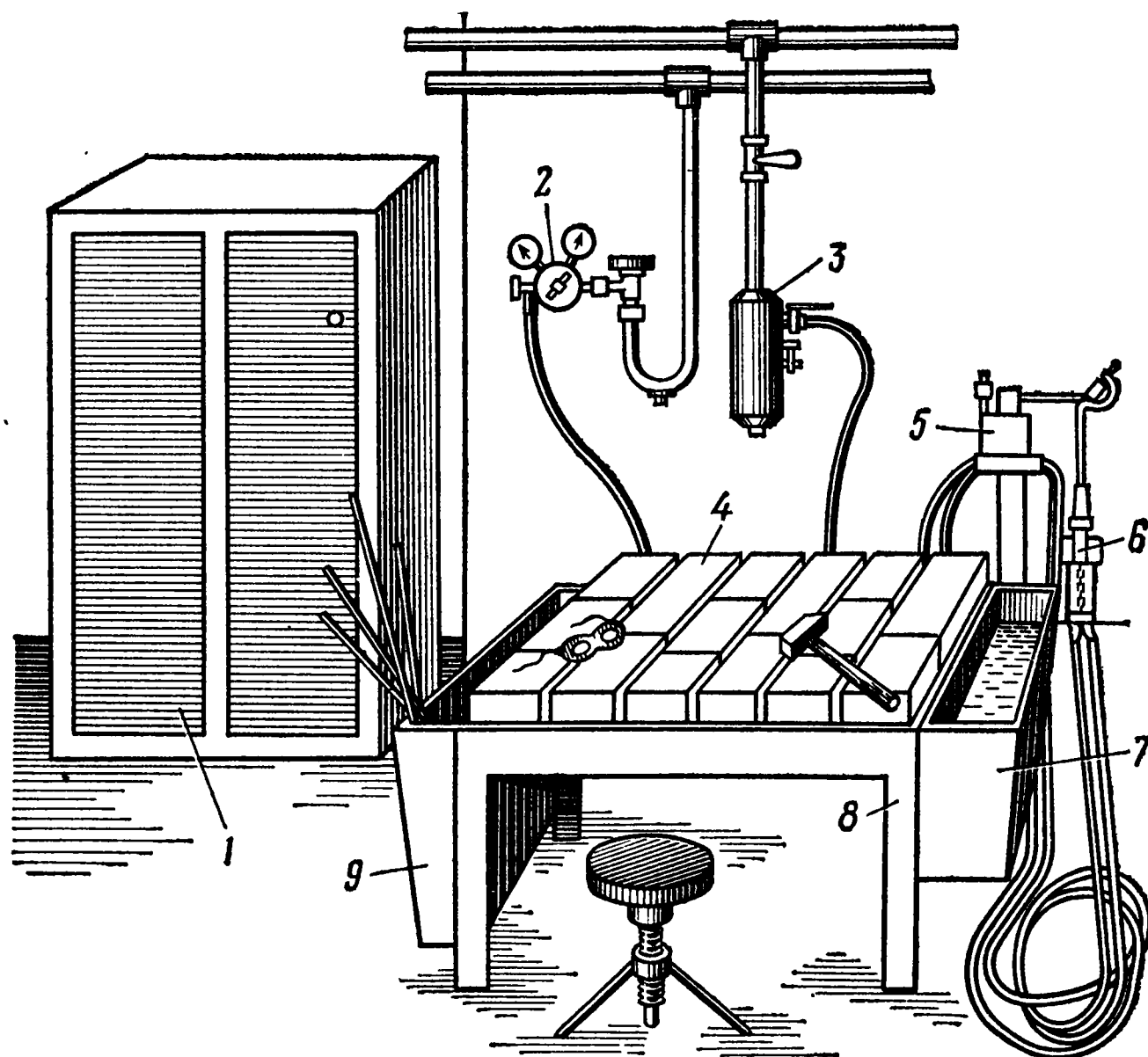


Рис. 3. Рабочее место паяльщика газопламенной пайки:

- 1 — шкаф для хранения инструмента; 2 — кислородный редуктор; 3 — предохранительный затвор; 4 — огнеупорный кирпич; 5 — экономизатор; 6 — горелка; 7 — сосуд с водой для охлаждения горелки; 8 — металлический стол; 9 — ящик для прутков припоя

Защита глаз рабочих при пайке может быть обеспечена очками закрытого типа, снабженными стеклами-светофильтрами. Для безопасной работы при газопламенной пайке можно рекомендовать очки С-14 «Восход-1» или «Восход-2» [6], которые выпускает Суксунский оптико-механический завод (пос. «Суксун» Пермской области). Очки С-14 представляют собой кожаную фигурную полумаску с вмонтированными в нее двумя пластмассовыми кольцами с навинчивающимися гайками, фиксирующими стекла и позволяющими производить их быструю замену.

Очки «Восход-1» и «Восход-2» состоят из двух рамок для стекол, откидных боковин и фиксирующего устройства.

Нижняя рамка очков, укрепленная неподвижно, имеет бесцветные стекла, верхняя — откидная, снабжена стеклами-светофильтрами Г-1, Г-2 или Г-3 (ГОСТ 9497—60*), отличаются очки между собой конструкцией фиксирующего устройства. Очки «Восход-1» имеют заушники, «Восход-2» — эластичную ленту, которая более надежно удерживает очки при резких движениях головы.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ

Кроме мероприятий по технике безопасности при обработке заготовок и пайке должны быть предусмотрены мероприятия, обеспечивающие безопасную работу при эксплуатации оборудования. На участке пайки должна быть инструкция по технике безопасности, знание и выполнение которой для всех работающих на участке обязательны. Важнейшие указания по технике безопасности должны быть оформлены в виде плакатов и вывешены на видных местах.

При эксплуатации оборудования для пайки должны быть предусмотрены мероприятия против поражения током, взрывов газовых смесей, выброса расплавленных солей и металлов, против ожогов, действия излучения на глаза и кожу человека.

Почти все способы нагрева при пайке связаны с применением электрического тока. Поэтому при выполнении паяльных работ, монтаже или исправлении неполадок имеется опасность поражения электрическим током. Характер и степень поражения зависят от величины силы тока. Ток до 0,002 А человек переносит безболезненно. Сила тока до 0,05 А вызывает болевые ощущения и является опасной. Сила тока выше 0,05 А может привести к смертельному исходу. С повышением напряжения опасность поражения током усиливается. Ввиду непостоянства сопротивления человеческого организма прохождению электрического тока, а также сопротивления одежды и обуви трудно точно определить опасное для жизни человека напряжение. При нормальных условиях работы, исправной и сухой одежде и обуви в сухих помещениях напряжение ниже 36 В считается безопасным. В сырых помещениях опасным является уже напряжение свыше 12 В. Наиболее опасным является включение пострадавшего в электрическую цепь сразу к двум фазам. Через организм человека в этом случае протекает ток 220 или 380 В, что может привести к смертельному исходу.

Для предупреждения поражения электрическим током при эксплуатации оборудования для пайки следует соблюдать следующие правила.

1. Корпуса источников питания, корпуса машин для контактной пайки должны быть заземлены.

2. В машинных и ламповых генераторах высокочастотных установок все металлические части и вторичный виток нагревательного контура должны быть заземлены.

3. Все устройства для подключения и переключения электрических цепей должны быть защищены кожухами.

4. При индукционной пайке для защиты от действия т. в. ч. необходимо устанавливать специальные экраны.

5. Проводить какие бы то ни было работы в установках, находящихся под напряжением, категорически запрещается.

6. Номинальная сила тока плавких предохранителей не должна превышать указанного в электрической схеме.

Правила технической эксплуатации электрооборудования промышленных предприятий регламентированы Государственной инспекцией по промэнергетике и электронадзору.

Ниже даны краткие сведения по технике безопасности при работе на различных установках.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПАЯЛЬНЫХ РАБОТ

Пайка электрическим паяльником. Не разрешается в производственных условиях использовать для питания электропаяльника сеть напряжением выше 36 В. Ручка электрического паяльника должна быть из изоляционного материала и сухой. Не разрешается вытаскивать из штепсельной розетки электропаяльник за шнур, чтобы избежать обрыва шнура, возникновения короткого замыкания и попадания под опасное напряжение.

При работе с электрическим паяльником необходимо строго соблюдать правила защиты от поражения электрическим током.

Пайка паяльной лампой. До разжигания паяльной лампы необходимо проверить ее исправность и при необходимости устранить подтекание горючего.

Паяльную лампу необходимо заполнить горючим не более 75% ее емкости.

Давление воздуха в лампе во избежание взрыва не должно превышать 1,5—2,0 кгс/см².

Запрещается доливать горючее в горящую лампу, разжигать лампу путем подачи горючего через горелку, снимать горелку до спуска давления.

Паяльные лампы можно выдавать только рабочим, знакомым с правилами обращения с ними.

Пайка газопламенной горелкой. При этом следует руководствоваться «Правилами техники безопасности и производственной санитарии при производстве ацетилена, кислорода и газопламенной обработке металлов» [10]. Перед началом работы необходимо проверить герметичность всей аппаратуры и шлангов: утечка газов может привести к отравлению рабочих и к образованию взрывоопасной смеси.

При зажигании горелки для пайки необходимо сначала открыть кислородный вентиль, затем ацетиленовый и сразу зажечь смесь.

Запрещается выполнять пайку горелкой в непосредственной близости от огнеопасных и легковоспламеняющихся материалов. При пайке на открытом воздухе расстояние от рабочего места до огнеопасных материалов должно быть не менее 10 м.

Запрещается выполнять пайку изделий, находящихся под давлением, а также резервуаров, контейнеров, бочек из-под легковоспламеняющихся веществ.

Баллоны с газами должны храниться в специальном помещении в стеллажах в вертикальном положении.

Не допускается хранение горючих газов в одном помещении с кислородными баллонами.

Небрежное обращение с баллонами со сжатыми газами (сильный удар, толчки, падение) может привести к взрыву большой разрушительной силы. В пределах завода или цеха баллоны следует перевозить на специальных тележках.

Запрещается ремонтировать вентиль на наполненном баллоне. Нельзя отогревать замерзший вентиль пламенем горелки или другим источником тепла с открытым пламенем. Для этого применяют пар или горячую воду.

К выполнению работ по газопламенной пайке допускаются лица обоего пола не моложе 18 лет, прошедшие инструктаж и сдавшие экзамены по технике безопасности.

Индукционная пайка (т. в. ч.). При производстве работ следует руководствоваться «Правилами безопасности при эксплуатации электротермических установок повышенной и высокой частоты» [8]. Высокочастотные установки, предназначенные для пайки, должны быть размещены в отдельном помещении и обеспечены ограждениями, механической или электрической блокировкой для предупреждения прикосновения к частям установки, находящимся под напряжением.

Все металлические части в установках с машинными или ламповыми генераторами и вторичный виток нагревательного контура должны быть заземлены.

Помещение с высокочастотными установками должно иметь вентиляцию, обеспечивающую нормальные условия работы обслуживающего персонала и охлаждение агрегатов.

При индукционной пайке для защиты от действия т. в. ч. необходимо устанавливать специальные экраны.

Категорически запрещается проведение ремонтных работ в установке, находящейся под напряжением. По окончании работы необходимо отключить генератор высокой частоты со стороны питающегося фидера (провода прямоугольного сечения).

При обнаружении неисправностей, пожаре и стихийных бедствиях паяльщик обязан немедленно отключить генератор. Настраивать на режим и наладивать высокочастотные установки разрешается только квалифицированным электромонтерам, имеющим на это соответствующее разрешение.

Пайка ультразвуком. Пульт управления и контрольные приборы для пайки ультразвуком должны быть размещены так, чтобы в процессе работы паяльщика было удобно занимать место у установки. Установка должна иметь приспособление для закрепления деталей. Акустический узел установки должен быть закрыт защитным кожухом, исключающим непосредственный контакт работающего с узлом во

время работы. Генераторы ультразвуковых установок должны соответствовать правилам устройства электроустановок (ПУЭ).
Допустимые уровни звукового давления для рабочих мест у ультразвуковых установок следует применять:

Среднегеометрические частоты 1/3 октавных полос, Гц . .	12 500	16 000	≥ 20 000
Уровни звукового давления, Б	75	85	110

При суммарном времени воздействия ультразвука менее 4 ч в смену указанные выше уровни следует увеличивать в соответствии с табл. 1.
Обычно рабочая частота ультразвуковых установок должна быть не ниже 18 кГц. Для защиты от воздействия вибраций применяют в отдельных случаях специальные раковины и антивибрационную обувь.

1. Поправки к уровням звукового давления для рабочих мест у ультразвуковых установок

Суммарная длительность воздействия ультразвука, ч	Поправка, Б	Суммарная длительность воздействия ультразвука, мин	Поправка, Б
1—4 1/4—1	+6 +12	5—15 1—5	+18 +24

Контактная пайка электросопротивлением. Широко применяют контактную пайку сопротивлением на специальных и обычных машинах для контактной сварки. При этом электроды контактных машин заменяют графитовыми или вольфрамовыми по конфигурации паяного шва.
Машины для контактной пайки общего назначения можно присоединять непосредственно к распределительным электрическим сетям напряжением не выше 660 В.

Вторичное напряжение трансформатора не должно превышать при холостом ходе машины 36 В, корпус машины надежно заземлен, конструкция переключателей ступеней трансформатора должна исключать возможность случайного соприкосновения с элементами машины, находящимися под напряжением.

В подвесных машинах один полюс цепи должен быть соединен с корпусом подвесного трансформатора, а корпус надежно заземлен.

Шкафы, пульты и станины контактных машин, внутри которых расположена электроаппаратура с открытыми токоведущими частями, находящимися под напряжением свыше 36 В, должны иметь дверцы с блокировкой, обеспечивающей отключение первичного напряжения с электроаппаратуры при открывании дверцы.

При открывании дверцы блокировочное устройство не должно иметь открытых токоведущих частей, находящихся под напряжением.

Конструкция машин должна предусматривать возможность установки ограждающих устройств, предохраняющих рабочего от возможных выплесков основного металла припоя и искр и позволяющих безопасно вести наблюдение за процессом пайки.

Работа у соляных ванн. Паяемые изделия и приспособления должны быть очищены от масла и хорошо высушены, в противном случае возможен выброс расплавленных солей из ванн.

В случае прожога тигля под ним должны быть предусмотрены сток солей и аварийный сборник. Соли, добавляемые в процессе работы в ванну, должны быть хорошо просушены. Их следует засыпать специальными совками небольшими порциями.

Во время работы у соляных ванн курить запрещается. Ванны должны быть оборудованы местной вентиляцией для удаления образующихся газов. Запрещается паяльщику работать у соляных ванн без рукавиц и специальных очков.

Работа на электропечах. При работе на электрических печах паяльщик должен хорошо знать правила их эксплуатации и следить за исправностью токоведущих частей.

При загрузке, очистке, ремонте и осмотре электрических печей ток должен быть отключен. Электрические печи должны иметь электроблокировку загрузочной дверцы печи, автоматически выключающую ток при открывании дверцы. Категорически

запрещается включать рубильник и нажимать пусковую кнопку при помощи металлических предметов.

Нельзя пользоваться неисправным рубильником, пусковой кнопкой и штепселем. О замеченных неисправностях в электрооборудовании и осветительной сети паяльщик обязан немедленно сообщить мастеру или старшему по смене.

Термитная пайка. Термитные смеси развивают при горении очень высокую температуру, поэтому неосторожное обращение с ними может привести к тяжелым ожогам [9].

Вести пайку необходимо в рукавицах, кожаных ботинках и в головном уборе, причем следить, чтобы волосы не выпадали из-под головного убора.

Одежда работающих (особенно рукава) не должна быть пропитана легковоспламеняющимися жидкостями: бензином, керосином, маслом и т. д.

Термитные спички во избежание ожога рук должны быть закреплены в специальной державке, на отрезке стальной проволоки или в плоскогубцах. Спички следует содержать и переносить отдельно от термитных смесей и патронов.

Коробку со спичками при производстве работ рекомендуется носить в металлических коробках. Спички могут загораться от трения между собой.

Во избежание пожара несгоревшие спички и раскаленный шлак термитных патронов следует класть только на несгораемое основание, например цементный пол и т. д., на котором отсутствуют легковоспламеняющиеся материалы.

При выполнении работ на высоте нельзя стоять и проходить под местом пайки.

Особую опасность представляет попадание влаги на раскаленные термитные патроны или тигель-формы, так как это может вызвать бурное парообразование и взрыв. Поэтому нельзя работать во время дождя под открытым небом, а также пользоваться термитными патронами, термитными смесями и тигель-формами, на которые попадала влага, запрещается наклоняться над тигель-формами или горящими термитными патронами.

При термитно-тигельной пайке немедленно после введения спички в термитную смесь работающий должен закрыть крышку тигля и отойти от него на расстояние не менее 1,5 м.

Подходить к тигель-форме разрешается не раньше, чем через 5 мин после окончания горения термита.

Если термит не воспламенился, то повторно зажигать его нужно с большой осторожностью, не ранее чем через 5 мин и при закрытой крышке тигля. При этом термитную спичку, привязанную к стальной проволочке, необходимо вводить через отверстие в крышке.

При необходимости сменить в тигле термит после неудавшегося его воспламенения горловина тигля при высыпании термита должна быть наклонена в сторону от работающего. Самым важным требованием является защита глаз. Весь процесс термитно-муфельной и термитно-тигельной пайки от момента воспламенения термита до момента удаления шлака нужно обязательно выполнять в очках.

Термитно-тигельную пайку можно выполнять в очках с белыми стеклами, а при термитно-муфельной пайке, в период горения термитного патрона, дающего яркое пламя, необходимы очки со светозащитными стеклами. Очень удобно при этом пользоваться комбинированными очками, у которых после окончания горения термитного патрона светозащитные стекла могли бы отводиться в сторону или подниматься. Термитные смеси, патроны и спички являются пожароопасными материалами. Поэтому помещение для их хранения должно быть сухим, несгораемым и соответствовать требованиям, установленным для хранилищ, пожароопасных материалов.

Хранение и транспортирование термита и спичек выполняют по особым правилам заводов-изготовителей, которые приведены в инструкциях по термитной пайке.

Небольшие количества термита и спичек разрешается хранить в общих складах и кладовых монтажных организаций, не приспособленных для хранения пожароопасной продукции. В этих случаях должны быть приспособлены запираемые железные шкафы или ящики, которые располагают не ближе 5 м от отопительных приборов (печей) и не ближе 1 м от сгораемых конструкций. Количество спичек при хранении не должно превышать 500 шт., а термитных патронов или смесей 50 кг (по 25 кг в каждом шкафу). Спички следует хранить в отдельных от термитных патронов или тер-

митных смесей шкафах или ящиках, выложенных внутри слоем асбеста толщиной 10 мм или футерованных огнеупорным кирпичом.

Следует подчеркнуть, что при всех способах пайки основным условием безопасной работы при эксплуатации оборудования и производстве паяльных работ является четкая организация труда и соблюдение правил техники безопасности.

САНИТАРНАЯ ГИГИЕНА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРИПОВ И ФЛЮСОВ

При производстве припоев и флюсов путем сплавления их компонентов основными факторами, вызывающими вредное воздействие на организм человека, являются высокая температура, а также выделение вредных паров, газов и пыли. Наиболее вредное воздействие оказывают пары металлов и солей, которые, попадая в организм человека, вызывают общее отравление, поражение кожи, раздражение слизистой оболочки глаз и т. п.

Плавильщик должен пользоваться труднозагорающейся одеждой и темными очками марки П-1, П-3 (ГОСТ 9497—60*), предохраняющими глаза от действия лучистой энергии и брызг металла и солей. Помещение, в котором производят плавление припоев и флюсов, должно иметь приточно-вытяжную вентиляцию.

Металлы и соли перед введением в расплавы должны быть подогреты до полного удаления влаги. В противном случае возможны выброс или разбрызгивание расплавов. При плавлении гигроскопичных флюсов ложку-шумовку или стержень, которые употребляют для перемешивания расплава и удаления шлака перед погружением в расплав, следует подогревать для удаления влаги с их поверхности. Присадку легкоиспаряющихся или легковыгорающих компонентов припоев и флюсов необходимо производить в последнюю очередь, когда сплав уже приготовлен. После введения указанных компонентов сплав нельзя перегревать, так как это вызывает усиление их испарения. При разливе припоев и флюсов во избежание взрывов изложницы или формы для припоев должны быть чистыми и подогреты до полного удаления влаги.

Опытным путем определены количества ядовитых веществ, поступление которых в организм не вызывает болезненных явлений, отравления при ежедневной работе в пределах 8 ч в течение всего рабочего стажа.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных газов, пыли и других аэрозолей в воздухе рабочей зоны производственных помещений являются максимальными, и превышение их не должно допускаться. По степени воздействия на организм человека вредные вещества подразделяют на 4 класса: 1 — вещества чрезвычайно опасные; 2 — вещества высокоопасные; 3 — умеренно опасные и 4 — малоопасные. Агрегатные состояния веществ в условиях производства могут быть в виде паров или газов (П), аэрозолей (А) и смеси паров и аэрозолей (П + А).

Предельно допустимые концентрации ядовитых газов, паров и пыли в воздухе производственных помещений приведены в табл. 2. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий изложены в нормативах СН 245—71 [9].

При одновременном содержании в воздухе рабочей зоны нескольких вредных веществ расчет общеобменной вентиляции следует производить путем суммирования объемов воздуха, необходимых для разбавления каждого вещества в отдельности до его ПДК, с учетом загрязнения приточного воздуха.

При этом допустимыми для проектирования и санитарного надзора следует считать такие концентрации (С) вредных веществ, которые отвечают формуле

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} = 1.$$

Из металлов, входящих в состав припоев, наиболее вредное воздействие на организм человека оказывают литий, калий, натрий, кадмий, бериллий, свинец, марганец и цинк.

Характеристика некоторых промышленных ядов при пайке приведена ниже.

2. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны

Вещество	ПДК, мг/м³	Класс опасности	Агрегатное состояние	Вещество	ПДК, мг/м³	Класс опасности	Агрегатное состояние
Окислы азота (в пересчете на O₂) . . .	5	2	П	Мышьяковый водород	0,3	2	П
Аммиак	20	4		Натрий родонистый (технический) . . .	50	4	А
Ацетон	200			Никель и его окись, закись, сульфид (в пересчете на Ni)	0,5	2	
Бензин-растворитель	300			Свинец и его неорганические соединения	0,01	1	
Бериллий и его соединения (в пересчете на Be)	0,001	1	А	Серная кислота, серный ангидрид . . .	1	2	
Борная кислота . . .	10	3	П + А	Соляная кислота . .	5		
Борный ангидрид . .	5	1	А	Сурьма, фториды, хлориды	0,3		П + А
Ванадий и его соединения	0,1			Фосфор желтый . . .	0,03	1	П
Германий четыреххлористый (в пересчете на Ge)	1			Фосфорный ангидрид	1	2	П
Дихлорэтан	10		2	П	Хлористый водород		5
Окись кадмия	0,1	1	А	Хромовый ангидрид, хроматы, бихроматы (в пересчете на Cr)	0,01	1	А
Марганец	0,3	2		Окись цинка	6	3	
Медь	1	3		Щелочи едкие (растворы)	0,5	2	
Молибден, растворимые соединения в виде аэрозоля конденсации	2						

Кадмий металлический не является токсичным. Соединения кадмия независимо от их состояния (пыль, дым, пары, туман) и путей поступления в организм человека (органы дыхания, желудочно-кишечный тракт) токсичны.

Профилактические мероприятия, предупреждающие поступление соединений кадмия в рабочую зону, заключаются в герметизации оборудования, устройстве общеобменной вентиляции в помещениях, где производятся операции, связанные с выделением содержащих кадмий паров, дыма, пыли, и местных вытяжных вентиляционных устройств у мест разлива металла и возможного выделения паров и пыли.

Средства индивидуальной защиты: спецодежда, спецобувь, резиновые перчатки, фартуки, респираторы типа «Лепесток» и промышленные противогазы с фильтрами, задерживающими дым.

Магний и его соединения в виде дыма, пыли и паров, поступая в организм человека, могут вызвать заболевания «литейной лихорадкой» при попадании на кожу магния или его сплавов, особенно если кусочки остались в ране, образуются плохо поддающиеся лечению болезненные припухания или гнойнички.

Средства индивидуальной защиты: спецодежда, спецобувь, респираторы и резиновые перчатки.

Медь может поступать в организм человека в виде пыли и паров. Действуя на желудок, медь и ее соли вызывают раздражающее и даже прижигающее действие. Вдыхание паров и высокодисперсных твердых частиц меди может привести к заболеванию «литейной лихорадкой» и инфекционным катаром верхних дыхательных путей. Санитарными нормами содержание меди в воздухе производственных помещений не нормируется.

Профилактические мероприятия, предупреждающие выделение пыли и паров меди в производственные помещения, заключаются в герметизации технологического оборудования и обеспечении устойчивой работы местной вытяжной и общеобменной систем вентиляции.

Средства индивидуальной защиты: спецодежда, спецобувь и респираторы типа «Лепесток».

Мышьяк в чистом виде не ядовит. Сильно токсичны мышьяковый и особенно мышьяковистый ангидриды, а также различные соли этих кислот.

Средства индивидуальной защиты: спецодежда, спецобувь, респираторы типа «Лепесток».

Мышьяковистый водород — высокотоксичный тяжелый бесцветный газ, в чистом виде не имеющий запаха (чесночный запах обнаруживается лишь при его распаде). В производственных условиях мышьяковистый водород образуется как побочный продукт при травлении металла серной или соляной кислотой.

Если металл или кислота загрязнены мышьяком, то выделению водорода сопутствует восстановление мышьяка до мышьяковистого водорода. Это соединение нестойкое, оно легко (нередко со взрывом) распадается на мышьяк и водород. Отравление наблюдается в самых разнообразных производствах, где по ходу технологического процесса выделяется водород.

Поступает мышьяковистый водород в организм человека через дыхательные пути. Действие его проявляется не сразу после поступления в организм, а по истечении некоторого времени (1—16 ч).

Профилактические мероприятия, предупреждающие выделение мышьяковистого водорода в производственные помещения, заключаются в герметизации аппаратуры и устройстве надежно действующей вытяжной вентиляции в местах возможного выделения газа.

Никель металлический малотоксичен. Соли никеля вызывают изменение слизистой оболочки носа и даже прободение носовой перегородки. При действии на кожу они вызывают кожные заболевания в виде никелевой экземы.

Для предупреждения выделения паров и пыли никелесодержащих материалов в производственные помещения необходимо герметизировать аппаратуру и оборудовать помещения как местной (вытяжкой), так и общеобменной вентиляцией. Важно также исключить возможность контакта работающих с растворами (электролитами) никеля механизацией производственных процессов и созданием защитных покрытий над электролизными ваннами.

Средства индивидуальной защиты: спецодежда и спецобувь (валенки, ботинки), а при работе с водными растворами — резиновые сапоги и резиновые перчатки.

Бериллий оказывает на организм человека особо вредное воздействие. Проникая через дыхательные пути и поры кожного покрова, бериллий вызывает отравление. Поэтому при выплавке припоев, содержащих бериллий, необходимы местная вентиляция и соблюдение других мер предосторожности против попадания пыли и паров в организм.

Оксид углерода — бесцветный газ без запаха и вкуса, не обладающий раздражающими свойствами. Часто содержится в газах металлургических печей.

В организм человека оксид углерода поступает через дыхательные пути и поражает нервную систему.

Для предупреждения поступления окиси углерода в производственных условиях необходимо герметизировать технологическое оборудование, оборудовать местную и общеобменную вентиляцию и тщательно следить за содержанием окиси углерода. Средствами индивидуальной защиты при невысоких концентрациях окиси углерода служат промышленный фильтрующий противогаз марки СО, а при высоких концентрациях — изолирующие противогазы (КИП-5).

Ртуть попадает в воздух производственных помещений преимущественно в виде паров, которые почти в 7 раз тяжелее воздуха и обычно скапливаются внизу.

Пары ртути не имеют запаха, цвета, не оказывают раздражающего действия, что делает незаметным присутствие их в воздухе.

К работе со ртутью не допускаются женщины и подростки.

Профилактические мероприятия, предупреждающие поступление паров ртути в производственные помещения, заключаются в герметизации емкостей и аппаратов.

Средства индивидуальной защиты: спецодежда, противогазы марки Г. В рабочих помещениях должен быть установлен постоянный контроль за наличием в воздухе паров ртути с помощью индикаторной бумаги, на которой наносят слой пасты из осадка, полученного при смешивании растворов иодида калия и сульфата меди с этиловым спиртом. В присутствии ртутных паров бумага розовеет. Не реже 2 раз в год следует определять содержание паров ртути в воздухе.

В бытовых помещениях производственных цехов и лабораторий, где применяют ртуть, устанавливают шкафчики для хранения зубных щеток, порошка и мыла, а также фонтанчики для полоскания рта. Спецодежду необходимо хранить в помещениях, где производится работа со ртутью, и стирать не реже 1 раза в пять дней.

Сероводород — бесцветный газ с запахом тухлых яиц при умеренной концентрации. При больших концентрациях сероводорода в воздухе ощущение запаха теряется, что нередко служит причиной отравлений.

Наличие сероводорода в воздухе можно обнаружить с помощью листов фильтровальной бумаги, смоченных уксусом. При внесении в атмосферу, содержащую сероводород, они через 30 с изменяют окраску от желтой до черной в зависимости от концентрации сероводорода.

Для оказания первой помощи в случае отравления сероводородом пострадавшего следует вынести на свежий воздух, при остановке дыхания сделать искусственное дыхание.

При заболевании глаз пострадавшего рекомендуется поместить в темную комнату и прикладывать к глазам прохладные примочки из 3%-ного раствора борной кислоты.

Средства индивидуальной защиты: фильтрующие промышленные противогазы марок КД или В.

Сернистый ангидрид обладает резким запахом и раздражающе действует на слизистые оболочки глаз и верхних дыхательных путей.

Длительное вдыхание воздуха с малой концентрацией сернистого ангидрида приводит к хроническим заболеваниям в форме гастритов, бронхитов и ларингитов.

Профилактические мероприятия заключаются в герметизации оборудования и установке надежно действующей вытяжной вентиляции и утилизации сернистого ангидрида для получения серной кислоты.

Средства индивидуальной защиты — фильтрующие противогазы.

Каустическая сода (едкий натр), попадая в твердом или растворенном виде на кожу, вызывает ожоги. Действие растворов тем сильнее, чем выше их концентрация и температура.

Опасно попадание даже самых малых количеств едкого натра в глаза, так как это вызывает тяжелое заболевание, исходом которого может быть слепота.

Оказывая первую помощь пострадавшему при попадании едкого натра на кожу или в глаза, следует обмывать пораженный участок кожи или глаза струей воды в течение 20 мин, после чего направить в лечебное учреждение.

Профилактические мероприятия, предупреждающие поступление паров щелочи в производственное помещение и кусочков или раствора щелочи на кожу человека, заключаются в герметизации технологического оборудования, соблюдении особых мер предосторожности при транспортировке расплавленной или растворенной щелочи, а также в механизации процессов измельчения и других процессов, протекающих в присутствии щелочи.

Средства индивидуальной защиты: спецодежда из щелочезащитной ткани, прорезиненные фартуки, резиновая обувь, резиновые перчатки и защитные герметичные очки.

Плавиковая кислота и ее пары (фтористый водород) ядовиты, сильно раздражают верхние дыхательные пути, вызывая слезы и слюнотечение. На кожу действуют сильно прижигающе с образованием трудно заживающих язв, чаще на кистях рук и лице.

Хронические осложнения, вызванные действием паров плавиковой кислоты небольшой концентрации, проявляются в заболеваниях верхних дыхательных путей, желудочно-кишечного тракта, зубов и костей.

Серная кислота интенсивно поглощает воду. При смешивании с водой выделяется большое количество тепла, в результате чего возможно разбрызгивание.

При нагревании серная кислота выделяет серный ангидрид, который с водяными парами воздуха образует белый туман, раздражающий и прижигающий слизистые оболочки верхних дыхательных путей (в особенности носа) и поражающий легкие. Попадая на кожу и в глаза, кислота вызывает тяжелые ожоги.

Соляная кислота с водяными парами воздуха образует туман, при вдыхании которого наблюдается раздражение верхних дыхательных путей, кашель, першение в горле и хрипота.

При постоянном воздействии паров соляной кислоты могут развиваться катары дыхательных путей. Длительное действие вызывает тяжелые ожоги.

При попадании любой кислоты на кожу или в глаза необходимо немедленно удалить кислоту обильным промыванием водой из водопроводного крана или шланга с распылителем, промыть 5%-ным раствором пищевой соды, после чего пострадавшего направить в лечебное учреждение.

Для предупреждения разбрызгивания и разливания кислот, а также выделения их паров в производственные помещения следует хранить кислоты в плотно закрываемых сосудах или емкостях, оборудованных местной вытяжной вентиляцией, а также механизировать транспортировку и разлив кислоты.

Средства индивидуальной защиты: спецодежда из кислотозащитной или шерстяной ткани, прорезиненные фартуки, резиновые сапоги, защитные герметичные очки из оргстекла или фильтрующие промышленные противогазы.

При работе с плавиковой кислотой пользуются противогазом с коробкой марки А, с серной — коробкой марки Ц с дополнительным противодымным фильтром, с соляной кислотой — марки БКФ.

ПЕРВАЯ ПОМОЩЬ ПРИ ПОРАЖЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Спасение пострадавшего от действия электрического тока зависит от того, насколько быстро он будет освобожден от тока и насколько быстро и правильно будет оказана первая помощь.

Прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением, вызывает в большинстве случаев непроизвольное судорожное сокращение мышц.

Вследствие этого пальцы, если пострадавший держит провод в руках, так сильно сжимаются, что высвободить провод из рук становится невозможным.

Если пострадавший продолжает соприкасаться с токоведущими частями, необходимо быстро освободить его от действия электрического тока.

Следует помнить, что прикасаться к человеку, находящемуся под током, без применения надлежащих мер предосторожности опасно для жизни.

Поэтому первое, что должен сделать оказывающий помощь, — как можно быстрее отключить ту часть установки, которой касается пострадавший.

При отключении установки может одновременно отключиться электрическое освещение, поэтому необходимо обеспечить освещение от другого источника, не задерживая при этом отключение установки и оказания помощи пострадавшему. Если отключение установки не может быть произведено достаточно быстро, необходимо принять меры для отделения пострадавшего от токоведущих частей, с которыми он соприкасается.

Для отделения пострадавшего от токоведущих частей или от провода напряжением до 1000 В следует воспользоваться сухой одеждой, канатом, палкой, доской или каким-либо другим сухим предметом, не проводящим электрический ток. Пользоваться при этом металлическими или мокрыми предметами не допускается.

Для того чтобы оторвать пострадавшего от токоведущих частей, можно его взять за одежду, например за полы пиджака или пальто, избегая при этом прикосновения к окружающим металлическим предметам и к частям тела, прикрытым одеждой. Оттаскивая пострадавшего за ноги, не следует касаться его обуви неизолированной рукой, так как обувь может быть сырой, а находящиеся в ней гвозди или крючки для шнуровки являются проводниками электрического тока.

Для изоляции рук при спасении следует надеть на них диэлектрические перчатки или обмотать руки сухим материалом; можно также накинуть на пострадавшего резину, прорезиненную или простую сухую материю.

Можно встать на сухую, не проводящую электрический ток подстилку. На ноги следует надеть резиновые галоши. Для отделения пострадавшего от токоведущих частей рекомендуется действовать по возможности одной рукой.

ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ТЕХНИКА

Основные определения и понятия. По пожарной опасности производственные процессы подразделяются на пять категорий (СНиП II-М.2-62).

К категории А относят производства, связанные с применением веществ, воспламенение которых может последовать от воздействия воды и кислорода воздуха, жидкостей с температурой вспышки 28° С и ниже, горючих газов, нижний предел взрываемости которых менее 10% к объему воздуха. К этой категории относят отделения ацетиленовых газогенераторов.

Цеха пайки относят к категории Г, т. е. к производствам, связанным с обработкой негорючих материалов в горячем, раскаленном состоянии, с систематическим выделением искр и пламени.

В зависимости от категорий выбирают строительные материалы с учетом их огнестойкости. Предел огнестойкости строительной конструкции — продолжительность в часах сопротивления строительной конструкции воздействию высокой температуры при пожаре до потери его несущей способности или образования сквозных трещин.

В зависимости от группы возгораемости и предела огнестойкости конструктивных элементов здания и сооружения подразделяются на пять степеней огнестойкости (СНиП II А-5-62).

Чтобы исключить или существенно снизить опасность распространения пожаров, на соседние объекты устанавливают противопожарные разрывы и преграды.

Противопожарные разрывы зависят от степени огнестойкости и устанавливаются строительными нормами и правилами (табл. 3).

В тех случаях, когда в здании размещаются производства категории А и Б, противопожарные разрывы, указанные в табл. 3 до жилых и общественных зданий, складов торфа, лесоматериалов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, увеличивают на 25%.

В случае невозможности соблюдения разрывов устраивают противопожарные преграды. Назначение преград — ограничить развитие и распространение пожаров. Основной противопожарной преградой является противопожарная стена. Это глухая негорючая стена, опирающаяся на собственный фундамент и перерезывающая все трудногорючие и сгораемые конструктивные элементы здания.

Противопожарные стены должны возвышаться над сгораемой кровлей не менее чем на 0,6 м, а над негорючей — не менее 0,3 м.

При проектировании и строительстве зданий предусматривают также эвакуационные выходы для облегчения безопасной эвакуации людей и имущества в случае возникновения пожара.

Огнетушительные вещества и технические средства тушения. К огнетушительным средствам относят воду в жидком и парообразном состоянии, пену, получаемую в результате химических соединений и механическим путем, углекислый газ (диоксид углерода), азот и продукты горения, все виды грунта и различные покрытия, изолирующие горящую поверхность от кислорода воздуха.

3. Противопожарные разрывы при различной степени огнестойкости производственных и жилых зданий или сооружений

Степень огнестойкости одного объекта	Разрыв (м) при степени огнестойкости другого объекта			
	I—II	III	IV	V
I—II	$\frac{10}{6}$	$\frac{12}{8}$	$\frac{16}{10}$	$\frac{16}{10}$
III	$\frac{12}{8}$	$\frac{12}{8}$	$\frac{16}{10}$	$\frac{16}{10}$
IV	$\frac{16}{10}$	$\frac{18}{10}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{20}{15}$
V	$\frac{16}{10}$	$\frac{18}{10}$	$\frac{20}{15}$	$\frac{20}{15}$
Примечание. В числителе данные для производственных, в знаменателе — для жилых зданий.				

Вода является универсальным средством огнегашения самого широкого применения. Однако имеется ряд ограничений для применения воды. Вследствие электропроводности воду нельзя использовать для тушения пожара в электроустановках. Вода вступает в химическую реакцию с калием, натрием и кальцием, в результате выделяется водород, образующий с воздухом взрывоопасную смесь. При попадании воды на карбид кальция образуется взрывоопасный газ — ацетилен, а при попадании воды на негашеную известь — тепло, способное воспламенить близко расположенные горючие материалы.

При попадании воды на раскаленные металлические поверхности возможно разложение воды на кислород и водород, механическое соединение которых создает взрывоопасную смесь.

При тушении легковоспламеняющихся жидкостей последние всплывают на поверхность воды и продолжают гореть и увеличивать размеры пожара.

Огнегасительные пены получают при смешивании газа и жидкостей, в результате чего образуются пузырьки, внутри которых заключены частицы углекислого газа. Пузырьки воздушно-механической пены содержат воздух.

Обладая малым удельным весом, пена всплывает на поверхность легковоспламеняющихся жидкостей, охлаждает наиболее нагретый верхний слой и прекращает поступление паров и газов в зону горения.

Пена хорошо удерживается не только на горизонтальных поверхностях, но и на вертикальных, поэтому ее применяют для тушения твердых веществ и защиты от нагрева.

Пена непригодна для водорастворимых жидкостей (спирта, ацетона, эфира), обладающих низким поверхностным натяжением и проникающих в пленку пены, вследствие чего вытесняется пенообразующее вещество, а пена разрушается.

В таких случаях при крупных пожарах применяют пеногенераторный порошок ППП-С, в состав которого входит мыло.

Пена непригодна для тушения пожара в электроустановках, так как она электропроводна, а также для тех веществ, с которыми она вступает в реакцию (натрий, калий, селитра).

Углекислый газ не горит и не поддерживает горения, а при тушении снижает концентрацию кислорода воздуха до величины, при которой невозможно горение.

При быстром испарении жидкой углекислоты образуется твердая снегообразная кислота с температурой ниже -70°C .

Углекислый газ неэлектропроводен, его можно применять для тушения в электроустановках. Для тушения пожара применяют также азот и продукты сгорания жидкого и твердого топлива. Углекислотой нельзя тушить этиловый спирт, в котором углекислый газ растворяется, и вещества, способные гореть без доступа воздуха (термит при термитной пайке).

К техническим средствам тушения относят химические огнетушители, ручные пожарные насосы, мотопомпы, пожарные автомобили.

Для тушения пожара в самом начале его возникновения в местах, опасных в пожарном отношении, применяют огнетушители.

В качестве ручных химических огнетушителей пенного типа применяют огнетушители ОП-3, ОП-4, ОП-5 и ОП-М (кабельный огнетушитель).

При тушении горючих жидкостей в небольших емкостях струи пены направляют под острым углом к борту, чтобы пена, скользя по борту, покрывала горящую жидкость.

Для тушения пожаров в электроустановках, а также почти всех твердых и жидких горючих веществ применяют огнетушители ОУ-2, ОУ-5 (ручные), содержащие в баллоне жидкую углекислоту под давлением 170 кгс/см^2 .

При тушении открывают вентиль, и в раструб огнетушителя устремляется струя углекислоты.

Благодаря мгновенному расширению жидкая кислота выбрасывается из раструба в виде снега. Длина струи около 2 м. Время действия огнетушителя ОУ-2 30 с, а ОУ-5 50 с, поэтому при тушении пожара надо действовать быстро и решительно.

Огнетушитель берут левой рукой за ручку и рывком вынимают из кронштейна, на котором он висит, а правой рукой поворачивают маховичок вентиля в направ-

лении против часовой стрелки до отказа. Струю углекислоты направляют на очаг горения, учитывая длину струи.

При пожарах в электроустановках наряду с огнетушителем следует принимать неотложные меры к отключению электроустановки с помощью рубильников, выключателей, предохранителей. После ликвидации загорания включать электроустановку разрешается только после очистки, проверки и восстановления нормального состояния всех питающих ее линий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асиновская Г. А. Газопламенная пайка металлов. М., Машгиз, 1963, 127 с.

2. Винников И. З. Справочник молодого паяльщика. М., «Высшая школа», 1969, 188 с.

3. Гаевая Л. А. Новые средства индивидуальной защиты глаз вспомогательных рабочих при электросварке. — «Сварочное производство», 1972, № 12, с. 57.

4. Евсеев Р. Е. Термитная сварка в электроустановочном производстве. М., Стройиздат, 1968, 127 с.

5. Китаев А. М., Губин А. И. Сварка и пайка тонкостенных трубопроводов. М., «Машиностроение», 1972, 135 с.

6. Лебедева К. В. Техника безопасности и производственная санитария на предприятиях цветной металлургии. М., «Металлургия», 1972, 230 с.

7. Петрунин И. Е., Лоцманов С. Н., Николаев Г. А. Пайка металлов. Изд. «Металлургия», 1973, 279, с. с илл.

8. Правила безопасности при эксплуатации электротехнических установок повышенной и высокой частоты. М., Машгиз, 1963, 40 с.

9. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. СН 245—71. М., Стройиздат, 1972.

10. Справочник по технике безопасности, противопожарной технике и производственной санитарии. Т. 1—3 Л., «Судостроение», 1972, 581 с.

11. Хряпин В. Е., Лакедемонский А. В. Справочник паяльщика. М., «Машиностроение», 1974, 327 с.

А

Агрегаты вакуумные 149
Азот — Применение при пайке 126
Азотоводородные смеси 127
Акриловая смола БМК-5 82
Алгоритм моделирующий 374
Алюминий — Влияние на оловянные припои 88
 — Свойства 877
Алюминий фтористый 121
 — — хлористый 103
Алюмогель 129, 140
Аммиак диссоциированный — Применение 127
Аммоний фтористый 129
Ангидрид борный 103
 — — фосфорный 129
Аргон—Марки 125
 — Применение при пайке 39
Асбест 245
Атмосфера контролируемая — Состав 141
 — — нейтральная 122
Атмосферы газовые восстановительные 123
 — — эндотермические 127

Б

Баллоны 178
Барабаны галтовочные 211
Бериллий — Свойства 276
 — Токсичность 392
 — Травление перед пайкой (состав раствора) 276
Биндер 289
Бронзы 266
Бура — Подготовка 119

В

Вакуум — Величина, необходимая для разложения окислов 124
 — Применение при пайке 39, 123
Вакуумметры 150, 152, 153
Ванны закалочные для сплавов ВК8 и Т15К6 — Состав 261

— — для анодирования магниевых сплавов — Состав и режимы работы 284
 — — для декапирования изделий из магниевых сплавов перед покрытием — Состав и режимы работы 282
 — — для контактного осаждения цинка на магний и его сплавы — Состав и режимы работы 283
 — — для обработки изделий из магниевых сплавов после пайки — Состав 282
 — — — магниевых сплавов для повышения коррозионной стойкости 284
 — — для осаждения меди на магний и его сплавы — Состав и режимы работы 283
 — — для предварительного нагрева инструмента перед пайкой погружением в расплавленный припой — Состав 261
 — — соляные — Безопасность работы 388
 — — — тигельные 168
Венская известь 214
Вентили вакуумные 150
 — — для баллонов 180
Вжигание покрытий в керамику — Температура 289
Висмут — Влияние на припои на основе свинца 92
Вода — Применение при тушении пожаров 395
Вода кристаллизационная 119
Водород — Применение для восстановления окислов 126
Водород хлористый — Взаимодействие с окислами 103
Воздух — Скорость движения в зоне пайки 383
Вольфрам — Очистка поверхности 272
 — Свойства 271
Время релаксации 9
 — — заполнения припоем горизонтально расположенного шва 356
Высота поднятия жидкости в капиллярах 25
 — — между двумя параллельными пластинами 25

Высота поднятия припоя в зазоре —
Формула для расчета 27

Г

Газ генераторный 141

— — природный 141

Газы горючие 127, 178, 179

Генераторы ацетиленовые 176

— — ламповые 157

— — машинные 159

Глубина проникновения тока при индукционной пайке 160

Горелка бензовоздушная 189

— — ГЗМ-62 188

— — ГЗУ-1-62 188

— — ГКУ-55 188

— — ГСМ-53 183

— — КГ 186, 187

— — МГ-ДС 187

— — МГ-120 185

— — «Москва» 184

ГОСТ 701—68 220

857—69 220

859—66 * 63

949—73 180

1499—70 89

2184—67 220

2567—73 220

3882—74 260

4515—48 70

5190—67 176

6268—68 182, 183

6616—74 207

6651—59 194

7164—71 195

7219—69 190

9497—60 * 390

9952—70 * 161

10157—73 40, 125

10678—63 * 220

10789—72 161

11964—66 * 211

13498—68 80

17349—71 47

19738—74 73, 93, 96

Градуировка вторичных приборов радиационных пирометров 205

Графит — Использование в приспособлениях 245

Графит силицированный — Использование для приспособлений 245

Губка титановая 129

Д

Дефекты паяных соединений 339

Деформации остаточные — Процессы образования при пайке 329

— — упругие — Распределение по длине паяных пластин 327

Диаграмма состояния сплавов системы алюминий — кремний 85

— — висмут — кадмий 97

— — висмут — олово 97

— — висмут — свинец — кадмий 97

— — галлий — олово 99

— — галлий — свинец 99

— — галлий — цинк 99

— — железо — марганец 85

— — золото — никель 79

— — золото — серебро 78

— — индий — кадмий 94

— — кадмий — серебро 94

— — кадмий — цинк 94

— — марганец — никель 85

— — медь — никель 65

— — медь — серебро 74

— — медь — фосфор 70

— — медь — цинк 63

— — никель — хром 81

— — олово — свинец 88

— — олово — цинк 88

— — свинец — висмут 92

— — свинец — кадмий 92

— — свинец — серебро 93

— — серебро — палладий 77

Диффузия — Определение 359

Диффузия атомарная 35

Диффузионная гипотеза образования связей 11

Диффузионная зона — Определение 7

Документация технологическая — Кодирование 378—380

Дунит 129

Ж

Железнение гальваническое 289

Железо — Влияние на никелевые припои 82

З

Зависимость механических свойств соединения от количества жидкой фазы в шве 43

— — упругости диссоциации окисла от температуры 123

Зазоры при пайке 26, 47, 48

Закон диффузии Фика 359

— — капиллярности первый 18

— — — второй 19

Затворы вакуумные 149

И

Изобарно-изотермический потенциал 31

Изотермы ликвидуса сплавов системы палладий — серебро — медь 77

— — серебро—медь—олово 75
 — — серебро—медь—цинк 75
 — — серебро—цинк—кадмий 75
Ингибиторы 220
Индий — Свойства 93
Интерметаллиды 42, 55, 251, 254, 266

К

Кадмий — Влияние на припой на основе свинца 92
 — Влияние на серебряные припои 72
 — Токсичность и меры защиты 391
Карналлит 104
Категории пожарной опасности 395
 «Квант плавления» 48
Керамика — Использование для приспособлений 245
Кинетика перемещения межфазных границ 49
Кислород — Растворимость в металлах 29
Кислоты, применяемые для травления металлов 220
Компоненты припоев, выполняющие роль флюсов 28
Константан 267
Константа равновесия реакции 20, 126
 — — скорости растворения 14
Контейнер для печной пайки 136
Контроль качества обезжиривания 219
 — — покрытия 238
Концентрации допускаемые смеси вредных веществ в воздухе 390
Коррозия щелевая 254
Коэффициент диффузии 55
 — — запаса прочности 344
 — — излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана—Больцмана) 353
 — — концентрации напряжений 324, 344
 — — растекания 19
 — — смачивания 19
 — — теплоотдачи 353
 — — упрочнения 59
Кремний — Влияние на припой 63, 81
Криолит 104
Кристаллизация сплавов 36

Л

Лампа кварцевая аргано-иодная
 НИК-220—1000 Тр 173
 — — манометрическая ИМ-12 154
 — — — ЛМ-2 153
 — — паяльная 188
Лигатура 121

Литий — Влияние на припой 72, 77
Лужение алюминия абразивно-кавитационное 281
 — — перед пайкой 235
 — — электролитическое 237

М

Магний — Свойства 281
 — Токсичность и профилактика 391
 — Применение паров при пайке алюминия 130
Марганец — Влияние на никелевые припои 82
Материалы для металло-керамических соединений — Правила выбора 302
 — Свойства 301 — Температурные коэффициенты линейного расширения 301
 — — для обезжиривания 212
 — — керамические 299
Матрица композиционных припоев 59
Медь — Использование в качестве припоя 62
 — Свойства 262
 — Токсичность и профилактика 391
 — Химический состав 64
Медь губчатая 129
Металлизация керамики 287
Металлы, применяемые для пайки с керамикой 301
Милливольтметры пирометрические 203
Моделирование математическое 347
Молибден — Влияние на никелевые припои 82
 — Использование для приспособлений 245
 — Свойства 269
Монель 267
Мощность колебательная высокочастотных установок 161
Мышьяк — Токсичность и профилактика отравления 392
Мышьяковистый водород — Токсичность и профилактика отравления 392

Н

Нагреватели вакуумных электропечей 148
 — — из дисилицида молибдена 139
Надежность металлокерамических соединений 303
Наконечники НЗП 187
 — — НП-Г 185
Наполнитель композиционных припоев 59
Напряжения собственные (внутренние) — Определение 325

- — остаточные — Образование при пайке 329
- — среза — Образование в паяном шве 328
- Насосы вакуумные диффузионные** 148
- — механические 148, 149
- Нахлестка** — Расчет длины 321
- Непропай** — Способы избежания 47
- Никель** — Влияние на серебряные припои 74
- Свойства 266
- Токсичность и меры предосторожности 392
- Никелирование керамики гальваническое** 289
- — химическое 290
- Ниобий** — Свойства 271
- Нихром** — Использование для приспособлений 244
- Пайка 267

О

- Обезжиривание** 213, 218, 235
- Обозначения кодовые** вида припоев 378
- — — флюсов 379
- — паяемого материала 379
- — показателей прочности паяемых соединений 380
- — припоев по температуре начала плавления 379
- Обработка гидropескоструйная** 211
- — дробеструйная 211
- Оксид углерода** — Применение для восстановления окислов 126
- Токсичность и профилактика отравления 392
- Окислы** — Возгонка 124
- Окислы металлов** — Теплота образования и температура разложения 123
- — на поверхности легированных сталей 252
- Олово** — Влияние на припои на основе меди 63, 70
- Операторы алгоритма** 375
- Оправки** 247
- Опытный образец изделия** 347
- Оснастка технологическая** — Предъявляемые требования 243
- Отклонения допускаемые** колебательной мощности установки т. в. ч. 161
- Очистка газов от примесей** кислорода и паров воды 129
- — поверхностей изделий термическая 210
- — — резиной 213
- — — ультразвуком 218
- — — химическая 213
- Очки защитные** 385

П

- Пайка** — Определение 7
- Пайка активная керамики с металлом** 294—296
- — алюминия бесфлюсовая 279
- — — высокотемпературная 277
- — — низкотемпературная 278
- — — припоями типа силумина 279
- — — с медью 280
- — — со сталью 280
- — — с титаном 280
- — бериллиевой бронзы 266
- — бериллия 276—277
- — газопламенной горелкой — Техника безопасности 387
- — в вакууме 30, 123, 125
- — вольфрама 271—273
- — в среде азота 30
- — — активных газов 126
- — — инертных газов 125
- — несимметричных соединений 329
- — симметричных соединений 326
- — циркония 273—275
- — алюминия 277—280
- — бронз 266
- — вольфрама 272
- — жаропрочных сталей 258
- — латуни 265
- — нержавеющей сталей 254, 255, 258
- — титана 563
- — углеродистых и низколегированных сталей 251
- — чугуна 262
- — циркония 274
- Пайка дефектных участков** чугунных литых деталей 262
- Пайка диффузионная** — Определение 55
- Пайка диффузионная** алюминия пористого 56
- — магния 56
- — тантала 276
- — тугоплавких металлов 57
- Пайка жаропрочных сплавов** 256, 258
- Пайка-закалка** инструмента 261
- Пайка индукционная** — Техника безопасности 387
- Пайка инструмента** газопламенная 260
- — печная 259
- — с нагревом т. в. ч. 259
- Пайка инструментальных сталей** 258—260
- Пайка композиционными припоями** 59—60
- Пайка контактно-реактивная** алюминия 52
- — жаропрочных сплавов и тугоплавких металлов 52

- — разнородных металлов 52
- — титана 52
- Пайка легких сплавов** — Удаление остатков флюсов 122
- Пайка меди** — Методы 263
- Припой 263, 264
- Флюсы 263
- Пайка медно-никелевых сплавов** 266
- Пайка молибдена** 269—271
- Пайка некапиллярная** 58—59
- Пайка неметаллизированной керамики с металлами** 298
- Пайка нержавеющей стали припоями на основе никеля** 251
- Пайка низкотемпературная латуни** 265
- — меди 263
- — никеля 267
- — углеродистых и низколегированных сталей 251
- — чугуна 262
- Пайка ниобия и его сплавов** 271
- Пайка нихромов** 267
- Пайка паяльной лампой** — Техника безопасности 387
- Пайка пластинок твердого сплава к корпусу инструмента**
- Методы пайки 260
- Подготовка к пайке и сборка 260
- Скорость нагрева 261
- Пайка пористых материалов** 52
- Пайка реактивно-флюсовая** — Определение 53
- Пайка сталей мартенситного класса** 251
- Пайка титана** 268—269
- Влияние газовой среды на свойства соединения 39
- Удаление окисных пленок 39
- Пайка циркония в аргоне** 273
- Пайка ультразвуком** — Техника безопасности 387
- Пайка ферритных нержавеющей сталей** 254
- Пайка электропаяльником** — Техника безопасности 386
- Пайка электросопротивлением** — Техника безопасности 388
- Палладий** — Влияние на припой 77, 79
- Пары магния** — Применение при пайке алюминия 130
- Пассивирование чугуна после травления** 234
- Пасты металлизационные** — Свертывание 289
- Состав 287, 288
- Степень измельчения компонентов 288
- Паяльники с периодическим нагревом** 189
- — с постоянным нагревом 190
- Пены огнегасительные** 396
- Пермаллой** 331
- Печи-ванны** 169, 170
- Печи для пайки** — Классификация 131
- — конвейерные 289
- Пирометр оптический** 203
- — радиационный РАПИР 204
- — фотоэлектрический ФЭП-4 203
- Плавиковая кислота** — Токсичность и профилактика отравления 393
- Плавнение контактное** — Стадии 48
- Расчет нестационарной кинетики 49
- Скорость 51
- «Пленочная» теория 11
- Площади растекания припоя по основному металлу** 22
- Погрешности допустимые при измерении вакуума** 150
- Подвижность металлов диффузионная** 359
- Подставки** 246
- Покрyтия металлические** — Виды и способы нанесения 235
- — технологические 253, 279
- Порошки для композиционных припоев** 60
- Постоянная Больцмана** 8
- Потенциометры автоматические электронные** 202
- — показывающие 195
- — самопишущие с дисковой диаграммой 195
- — — с ленточной диаграммой 196
- — со струнным компенсатором 202
- Предел выносливости** 69, 367, 369
- — огнестойкости строительной конструкции 395
- — прочности 36, 37, 69, 72, 87, 90, 332
- Пределы измерения вторичных приборов радиационных пирометров** 205
- — прочности паяных соединений 332
- Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе** 390
- Припой** — Классификация 62
- Компоненты, выполняющие роль флюсов 28
- Требования 62
- Припой алюминиевые** 85—87
- — висмутовые 96
- — галлиевые 98
- — для пайки алюминия в защитной атмосфере 279
- — жаропрочных сплавов (зарубежные) 257
- — магниевых сплавов 282

- — — минералокерамики 75
- — — тантала 276
- — — твердосплавных пластинок к корпусу инструмента 261
- — — хромистых ферритных сталей 254
- — — циркония 274, 275
- — для соединения керамики с металлом по активной технологии 296
- — железо-марганцевистые (ВЗМИ-49) 85
- — золотые 47
- — индиевые многокомпонентные 94
- — кадмиевые 94, 95, 251
- — композиционные 59, 62
- — магниевые 87
- — марганцевые 84
- — медные с Ni, Mn, Ag 68
- — медно-никелевые 65 — Физические свойства 69 — Химический состав 68
- — медно-фосфорные 70 — Прочность паяных соединений 71 — Физические свойства 71 — Химический состав 70
- — медно-цинковые 63 — Температура плавления 64 — Физико-механические свойства 64, 65, 67 — Химический состав 64, 66, 67
- — многокомпонентные серебряные 73
- — — с палладием 77, 79
- — на основе алюминия 85
- — — галлия для пайки магниевых сплавов (пасты) — Состав 284
- — — железа 84
- — — марганца 84
- — — никеля 257
- — — свинца 93
- — — цинка (низкотемпературные) 251
- — никелевые с В, Р и Ве 81
- — — с Mn, Mo и Si 83
- — — с Si, Fe, In 82
- — оловянно-свинцовые — Механические свойства 90 — Физико-механические свойства 90 — Химический состав и область применения 89
- — оловянные с Ag, Zn, Sn, Cu, Cd 91
- — платиновые 80, 81
- — свинцовые 92—93
- — серебряные — Растекаемость по нержавеющей стали 254 — Состав и свойства 72, 261
- — — с кадмием, цинком и медью 76
- — — с литием 74

- — — с медью и цинком 74
- — — с никелем и марганцем 76
- — — с оловом 76
- — — с палладием 76
- — стеклокристаллические 297
- — титановые 98
- — цинковые 95
- Припой-пасты для пайки магниевых сплавов 284**
- Приспособления для сборки перед пайкой — Материалы 244**
- Назначение 243
- Требования 243
- Прокладки компенсационные 260, 331**
- Промывка деталей после химической очистки 235**
- Прочность паяльных соединений в зависимости от величины зазора 333**
- — — от времени выдержки 336, 337
- — — от толщины шва 336
- — — от свойств основного металла 333
- — внахлестку 321
- — встык 321
- — втавр 322
- — из алюминиевых сплавов 278
- — с мягкой прослойкой 322
- Процессы, протекающие при флюсовании 102**

Р

- Рабочее место паяльщика 384**
- Равенство Юнга 51**
- Рампа 181**
- Растворители — Правила использования 383**
- Растворители органические 214**
- Растворимость кислорода в металлах 29**
- — металлов в титане 41
- Растворитель Р-5 82**
- Растекание припоя — Способы ограничения 238**
- Расчет нестационарной кинетики контактного плавления 49**
- Рафинирование припоя 237**
- Редукторы 181**
- Режим обезжиривания алюминия и его сплавов 213**
- — керамических деталей 214
- — магния и его сплавов 213
- — никеля и его сплавов 214
- — свинца и его сплавов 214
- — электрохимического 218
- Режимы пайки керамики с металлом 292**
- — травления для удаления со стали незначительных слоев окислов 224
- — химического травления алюминия и его сплавов 222

- — — вольфрама 224
- — — золота и его сплавов 222
- — — магния и его сплавов 223
- — — меди и ее сплавов 228
- — — молибдена 224
- — — никеля и его сплавов 227
- — — серебра 222
- — — сталей нержавеющей 221
- — — — углеродистых 221
- — — — хромистых 223
- — — — хромоникелевых 223
- — — тантала 222
- — — титана и его сплавов 224
- Режим электрохимического травления**
легированной стали 233
- — металлов и сплавов 232
- — углеродистой стали 233
- Рекристаллизационная теория** 11
- Ртуть** — Токсичность и профилактика 392

С

- Самофлюсование** 28
- Сборка металлокерамических узлов** 290
- Свойства физические газов и паров** 137
- Серебро** — Влияние на медно-золотые припои 78
- Влияние на оловянно-цинковые припои 88
- Свойства 72
- Серная кислота** — Техника безопасности при работе 393
- Серный ангидрид** — Токсичность и профилактика 393
- Сероводород** — Токсичность и профилактика 393
- Скорость диффузии** 55
- — контактного плавления 51
- — нагрева при пайке 261, 358
- — реакции 8
- Силикагель** 129, 140
- Смеси азотоводородные** 127
- Сода каустическая** — Техника безопасности при работе 393
- Соединения металлокерамические внутренние цилиндрические** 316
- — комбинированные 317
- — конусные 316
- — охватывающие цилиндрические 312
- — торцовые лезвийные (ножевые, рантовые) 310
- — — компенсированные 306, 309
- — — некомпенсированные 307
- Соединения паяные** — Допускаемые напряжения 343 — Прочность 64, 71, 72, 87 (см. также *Прочность паяных соединений*)

- Соляная кислота** — Безопасность работы 394
- Состав ванн для обезжиривания алюминия и его сплавов** 212
- — керамических деталей 214
- — магния и его сплавов 213
- — меди и ее сплавов 212
- — никеля и его сплавов 214
- — свинца и его сплавов 214
- — стали и чугуна 212
- Состав ванн для травления алюминия и его сплавов** 222
- — вольфрама 224
- — золота и его сплавов 222
- — кадмия 230
- — магния и его сплавов 223
- — молибдена 224
- — олова 230
- — свинца 230
- — серебра 222
- — сталей нержавеющей 221
- — — углеродистых 221
- — — хромистых 223
- — — хромоникелевых 223
- — тантала 222
- — титана и его сплавов 224
- — цинка 230
- Состав растворов для травления меди и ее сплавов** 228, 229
- — никеля и его сплавов 227
- Состав травильных паст** 231
- Состав фазовый сплавов системы серебро—медь—цинк** 75
- Состав электролитов для обезжиривания** 217
- — для травления легированной стали 233
- — — металлов и сплавов 232
- — — углеродистой стали 233
- Составы для комбинированного обезжиривания и травления стали и чугуна** 235
- — моющих средств при ультразвуковом обезжиривании 219
- — смесей солей, применяемых в соляных ваннах 171
- Спай** — Определение 7
- Ориентировка кристаллов 32
- Спай «бездиффузионный»** 9, 10
- — диспергированный 10, 16
- — контактно-реакционный 15
- — растворо-диффузионный 9, 13
- Спецодежда для работы с кислотами и щелочами** 382
- Сплавы магниевые** — Свойства 281
- Способы пайки металлов с керамикой** 287
- Среда восстановительная** 126
- — газовая — Воздействие на паяемый металл 129

Средства тушения пожара технические 396
Стали низколегированные — Пайка 252
Стеклоприпой — Назначение 286, 297
 — Технология получения 297
 — Химический состав 298
Степень растекаемости припоев 289
 — — огнестойкости зданий и сооружений 395
Стойкость коррозионная паяных соединений алюминия 279
Сурьма — Влияние на оловянно-свинцовые припои 88

Т

Тантал — Свойства 275
Твердосплавные пластинки — Крепление в пазах инструмента перед пайкой 260
Твердые растворы — Механические свойства 41
Твердые сплавы — Пайка к углеродистой стали 260
Телескоп ТЕРА-50 204
Температура испарения некоторых элементов в вакууме 125
 — — максимальная в электропечах колпачковых и шахтных 133
 — — плавления 10, 21
 — — пайки вольфрама 10
 — — разложения окислов 123
Температурные коэффициенты линейного расширения 326
Теория капиллярного течения припоев динамическая 25
 — — — статическая 25
Теплота образования окислов 123
Термитная пайка — Техника безопасности 389
Термометры сопротивления 194
 — — манометрические 194
Термопары — Технические характеристики 206
Термоциклирование 56
Технологический процесс очистки поверхности бериллия 231
 — — травления алюминия и его сплавов 229
 — — — меди и ее сплавов 226
 — — — сталей 225, 226
 — — — титана и его сплавов 230
 — — — чугуна 225
Технологическое проектирование 346
Титан — Взаимодействие с газовой средой 39
 — Охрупчивание при пайке 57
 — Свойства 268

Толщина металлизационного покрытия керамики 289
Точка росы 126
Травление с помощью ультразвука 234
 — — химическое 219
 — — электрохимическое 234
Трещины 250, 255, 256, 260, 264
ТУ 6-01-432—69 82
ТУ 6-10-1251—72 82

У

Углекислый газ — Применение для тушения пожаров 396
Углерод — Влияние на никелевые припои 82
Удаление остатков флюса при высокотемпературной пайке 121
 — — при низкотемпературной пайке 122
Узлы металлокерамические с армированным изолятором 318
 — — с армированным компенсаторным кольцом 319
 — — с комбинированными соединениями 317
Ультразвук — применение для очистки деталей от остатков флюсов 122
Упрочнение контактное 37
Упругость диссоциации окисла 123
Уравнение Гиббса 26
 — — диффузии 50
 — — скорость растворения 13
 — — состояния производства паяных изделий 362
 — — Фика 35
Установка автоматическая УЧВ-2А для получения водорода высокой чистоты 142
 — — для диссоциации аммиака 140
 — — для диффузионной пайки в вакууме (У-344) 167
 — — для обезжиривания в горячих растворителях 215
 — — — комбинированным способом 215
 — — для пайки в вакууме биметаллических трубных заготовок (У-268) 167
 — — — изделий под давлением 168
 — — — лазерная СУ-1 175
 — — — лопаток газовых турбин в вакууме (У-184М) 167
 — — — металлов и металлов с керамикой в контролируемой атмосфере (600Э521) 167
 — — — погружением 171
 — — — с кварцевыми лампами 172

- — — т. в. ч. (ЛМ-4199, ПС-1) 156, 157
- — — электронным лучом с местным нагревом (ЭЛУ-4) 175
- — — электросопротивлением 163
- — — для получения газозащитной среды 141
- — — контролируемых атмосфер 141, 383
- Установки очистительные — Размещение 382

Ф

- Фаза жидкая — Регулирование количества при контактно-реактивной пайке 51
- Фарфор — Применение для приспособлений 245
- Флюсование — Процессы 102
- Флюсы — Выбор при пайке нержавеющей сталей 253
 - Механизм действия 103
 - Назначение 27
 - Правила безопасного применения 383
 - Требования 102
- Флюсы газообразные 129
 - — для высокотемпературной пайки 107, 119, 277
 - — для низкотемпературной пайки легкоплавкими припоями 115
 - — — меди и ее сплавов 117, 263
 - — — металлов — Приготовление 120, 121
 - — — на основе хлоридов металлов 110
 - — — сталей 116
 - — — для пайки алюминия и его сплавов 104, 107, 113, 118, 277
 - — — кадмия 118
 - — — легких сплавов — Приготовление 121
 - — — магниевых сплавов 104, 109, 282
 - — — никелевыми, медными и серебряными припоями при температуре $> 600^{\circ}\text{C}$ — Состав и назначение 105
 - — — олова 118
 - — — титана и его сплавов 104
 - — — свинца 18
 - — — углеродистых и низколегированных сталей 251
 - — — черных и цветных металлов 104, 119
 - — — цинка 118
 - — — на основе канифоли 110
 - — — неорганических соединений 113

- — — органических соединений для низкотемпературной пайки 110
- — — хлоридов металлов 114
- — — образующие на поверхности металлов защитные пленки 263
- — органические бесканифольные 112
- — порошкообразные — Хранение 120
- Фосфор желтый 129
- Фосфорный ангидрид — Применение для сушки газов 129
- Фторборат аммония 129
 - — калия 103, 129

Х

- Хлориды — Использование в качестве флюсов 53

Ц

- Цинк — Влияние на алюминиевые припои 87
- Влияние на медно-цинковые припои 63
- Влияние на медно-фосфорные припои 70
- Влияние на оловянно-свинцовые припои 88
- Влияние на серебряные припои 72
- Влияние на эвтектический сплав медь-фосфор 70
- Цирконий — Свойства 273

Ч

- Частота тока рабочая — Значения и допустимые отклонения 161, 162
- Чугун — Классификация и свойства 262

Ш

- Шланги 181
- Шов — Определение 7
- Шов паяный — Пластические свойства 342
 - Протяженность при пайке медью 63
 - Содержание основного металла 35
- Шоопирование 236

Э

- Электропаяльники 190
- Электропаяльники абразивные 193
 - — ультразвуковые 193
- Электропечи — Техника безопасности при работе 388
- Электропечи вакуумные непрерывного действия — Технические характеристики 145

- — индукционные 154—155
- — колпачковые 133 — Технические характеристики 136, 144
- — с контролируемой атмосферой 131
- — с экранной теплоизоляцией 146
- — шахтные 133 — Технические характеристики 136, 146
- Электropечь** вакуумная СКБ-7050 143
- — И.059.012 146
- — ОКБ-1152 131
- — ОКБ-1153 131
- — СКБ-7001А 133
- — СКБ-7018 133
- — СКБ-7049 133
- — СНО-3.4,5 2/16 137
- — сопротивления ОКБ-1107 137
- — СШВ-15.15/13Э-М₂ 146
- — элеваторная вакуумная СЭВ—8.8/16ЭМ₁ 144
- Элементы** математического моделирования технологического процесса пайки 349—374
- Температурное условие 349
- Условие взаимодействия окисной пленки и металла с газовой средой (флюсом) 354
- Условие выносливости 365
- Условие долговечности 372
- Условие конструктивной приемственности изделия 356
- Условие коррозионной стойкости и старения 370
- Условие металлургического взаимодействия припоя с паяемым материалом 357
- Условие надежности 373
- Условие пластичности 369
- Условие прочности 363
- Условие смачиваемости и растекаемости 355
- Условие теплового баланса 357
- Условие технологичности 361
- Эмульсия** для обезжиривания 215
- Энергетическая гипотеза** 11
- Этапы** проектирования технологического процесса 377

Леопольд Леопольдович Гржимальский,
Александр Иванович Губин,
Авиэтта Сергеевна Екатова,
Виктор Кузьмич Ерошев,
Ирма Ирмович Ильевский,
Иван Иванович Киселев,
Сергей Николаевич Лоцманов,
Ирина Юрьевна Маркова,
Георгий Александрович Николаев,
Виктор Сергеевич Новосадов,
Вевея Владимировна Орлова,
Иван Егорович Петрунин,
Генрих Николаевич Стрекалов,
Виктор Петрович Фролов,
Юрий Федорович Шеин

СПРАВОЧНИК ПО ПАЙКЕ

Редакторы издательства *Д. В. Баженов,*
З. З. Акчурина, Н. С. Москаленко

Технический редактор *Н. Ф. Дёмкина*
Переплет художника *Н. Е. Алёшиной*
Корректор *Н. И. Шарунина*

Сдано в набор 10/I 1975 г. Подписано к печати
11/VIII 1975 г. Т-13426. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага
типографская № 3. Усл. печ. л. 25,75 (в т. ч. вкл.
0,25). Уч.-изд. л. 38,45. Тираж 50 000 экз. Заказ 1826.
Цена 2 р. 03 к.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва,
Б-78, 1-й Басманный, д. 3.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинград-
ское производственно-техническое объединение
«Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзпо-
лиграфпрома при Государственном комитете Со-
вета Министров СССР по делам издательств, по-
лиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград,
П-136, Гатчинская ул., 26.

2р.03к.



«МАШИНОСТРОЕНИЕ»